



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

트롤 어선 선종의 선회성능 추정 정도 향상에 관한 연구

A study on the improvement of the accuracy of fishing vessels
manoeuvrability prediction

지도교수 이 춘 기

2020년 2월

한국해양대학교 대학원

항해학과

김 수 형

본 논문을 김수형의 공학박사 학위논문으로 인준함

위원장 채 양 범 (인)

위 원 임 정 빈 (인)

위 원 최 찬 문 (인)

위 원 김 민 선 (인)

위 원 이 춘 기 (인)

2019년 12월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
List of Symbols	vii
Abstract	xi

1. 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 동향 및 목적	4
1.3 연구 내용 및 한계	5
2. 조종운동 수학모델	10
2.1 좌표계	11
2.2 조종운동 방정식	11
2.2.1 선체에 작용하는 힘과 모멘트	15
2.2.2 프로펠러에 작용하는 힘	15
2.2.3 타에 작용하는 힘과 모멘트	17
2.3 경험식	22
2.3.1 선미 형상을 고려하지 않은 경험식	22
2.3.2 선미 형상을 고려한 경험식	26

3. 경험식의 유효성 검증	30
3.1 대상 선박 선정	30
3.2 조종 유체력 미계수 도출	31
3.3 선회운동 시뮬레이션 수행	38
3.3.1 수행 조건	38
3.3.2 수행 결과	38
3.3.3 수행 결과 분석	47
4. 보정 경험식 도출	49
4.1 대상 선박 선정	49
4.2 선형 특성 계수 확인	51
4.3 조종 유체력 미계수 분석	57
4.4 보정 경험식 도출	67
4.4.1 상관관계 그래프	68
4.4.2 경험식 도출	87
5. 보정 경험식의 유효성 검증	94
5.1 조종 유체력 미계수 도출	94
5.2 선회운동 시뮬레이션 수행	100
5.2.1 수행 조건	100
5.2.2 수행 결과	100
5.2.2 수행 결과 분석	108
5.3 간섭 계수 값에 대한 고찰	110
6. 요약 및 결론	113
참고문헌	115

List of Tables

Table 1.1 Criteria of IMO standards	2
Table 3.1 Dimension of ships	31
Table 3.2 Hydrodynamic derivatives of target fishing vessels	32
Table 3.3(a) Value of turning-trajectories of F1	40
Table 3.3(b) Value of turning-trajectories of F2	42
Table 3.3(c) Value of turning-trajectories of F3	44
Table 3.3(d) Value of turning-trajectories of F4	46
Table 3.4 Quantitative comparison of turning-trajectories	48
Table 4.1 dimension of ships	50
Table 4.2 Comparison of hull shape parameters	53
Table 4.3(a) Comparison of linear derivatives	58
Table 4.3(b) Comparison of non-linear(lateral force) derivatives	60
Table 4.3(c) Comparison of non-linear(moment) derivatives	62
Table 4.3(d) Comparison of interaction coefficients	64
Table 5.1 Hydrodynamic derivatives of target fishing vessels	95
Table 5.2(a) Value of turning-trajectories of F1	102
Table 5.2(b) Value of turning-trajectories of F2	104
Table 5.2(c) Value of turning-trajectories of F3	106
Table 5.2(d) Value of turning-trajectories of F4	108
Table 5.3 Quantitative comparison of turning-trajectories	109

List of Figures

Fig. 1.1 Flow charts for evaluation for ship manoeuvrability (Kijima 1995)	6
Fig. 1.2 Flow charts for deduction of modified empirical formula	8
Fig. 2.1 Coordinate systems	11
Fig. 2.2 Interaction coefficients of a_H and x_H (Kijima et al., 1990)	24
Fig. 2.3 Rudder force and additional force induced by steering	25
Fig. 3.1(a) Comparison of values of linear derivatives	34
Fig. 3.1(b) Comparison of values of non-linear(lateral force) derivatives ·	35
Fig. 3.1(c) Comparison of values of non-linear(moment) derivatives	36
Fig. 3.2 Correlation between derivatives and hull shape parameters	37
Fig. 3.3(a) Comparison of turning-trajectories of F1	40
Fig. 3.3(b) Comparison of turning-trajectories of F2	43
Fig. 3.3(c) Comparison of turning-trajectories of F3	45
Fig. 3.3(d) Comparison of turning-trajectories of F4	47
Fig. 4.1 Values of C_b according to L/B	51
Fig. 4.2(a) Comparison of ratio of basic dimensions	54
Fig. 4.2(b) Comparison of hull shape parameters	55
Fig. 4.2(c) Comparison of hull shape parameters	56
Fig. 4.3(a) Comparison of linear derivatives	59
Fig. 4.3(b) Comparison of non-linear(lateral force) derivatives	61
Fig. 4.3(c) Comparison of non-linear(moment) derivatives	63
Fig. 4.3(d) Comparison of interaction coefficients	66
Fig. 4.4(a) Correlation between Y_{β}' and hull shape parameters	69

Fig. 4.4(b) Correlation between $Y_r - (m' + m_x')$ and hull shape parameters	70
Fig. 4.4(c) Correlation between N_β' and hull shape parameters	71
Fig. 4.4(d) Correlation between N_r' and hull shape parameters	72
Fig. 4.4(e) Correlation between $Y_{\beta\beta}'$ and hull shape parameters	73
Fig. 4.4(f) Correlation between Y_{rr}' and hull shape parameters	74
Fig. 4.4(g) Correlation between $Y_{\beta rr}'$ and hull shape parameters	75
Fig. 4.4(h) Correlation between $Y_{\beta\beta r}'$ and hull shape parameters	76
Fig. 4.4(i) Correlation between $N_{\beta\beta}'$ and hull shape parameters	77
Fig. 4.4(j) Correlation between N_{rr}' and hull shape parameters	78
Fig. 4.4(k) Correlation between $N_{\beta rr}'$ and hull shape parameters	79
Fig. 4.4(l) Correlation between $N_{\beta\beta r}'$ and hull shape parameters	80
Fig. 4.4(m) Correlation between $1 - t_R$ and hull shape parameters	81
Fig. 4.4(n) Correlation between a_H and hull shape parameters	82
Fig. 4.4(o) Correlation between x_H' and hull shape parameters	83
Fig. 4.4(p) Correlation between ε and hull shape parameters	84
Fig. 4.4(q) Correlation between γ and hull shape parameters	85
Fig. 4.4(r) Correlation between $1 - w_{p0}$ and hull shape parameters	86
Fig. 4.5(a) Trendline between linear derivatives and hull shape parameters	88
Fig. 4.5(b) Trendline between nonlinear(lateral force) derivatives and hull shape parameters	89
Fig. 4.5(c) Trendline between nonlinear(moment) derivatives and hull shape parameters	90
Fig. 4.5(d) Trendline between interaction coefficients and hull shape parameters	91

Fig. 5.1(a) Comparison of linear derivatives derived from original and modified formula	96
Fig. 5.1(b) Comparison of non-linear(lateral force) derivatives derived from original and modified formula	97
Fig. 5.1(c) Comparison of non-linear(moment) derivatives derived from original and modified formula	98
Fig. 5.1(d) Comparison of interaction coefficients derived from original and modified formula	99
Fig. 5.2(a) Comparison of turning-trajectories of F1	102
Fig. 5.2(b) Comparison of turning-trajectories of F2	104
Fig. 5.2(c) Comparison of turning-trajectories of F3	106
Fig. 5.2(d) Comparison of turning-trajectories of F4	108
Fig. 5.3 Turning characteristics depending on the variation of F3	111
Fig. 5.4 Values of $C_b B/L$ according to A_R/Ld	112

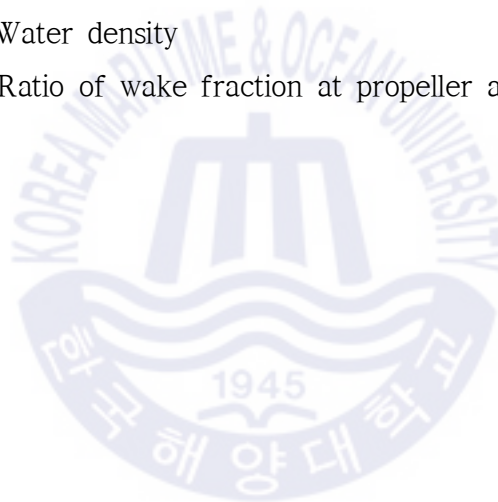
List of Symbols

A_R	Movable area of rudder
A_{R1}	Movable area of rudder affected by propeller wake
A_{R2}	Movable area of rudder unaffected by propeller wake
a_H	Rudder force increase factor
B	Ship breadth
C	Coefficient for starboard and port rudder
C_b	Block coefficient
C_s	Flow straightening coefficient of hull
C_p	Flow straightening coefficient of propeller
C_{wa}	Water plane area coefficient of aft
C_{pa}	Prismatic coefficient of aft
C_1, C_2, C_3	Experimental coefficients of K_T
D_P	Propeller diameter
d	Ship draft
e_a	Fullness of aft run
F_N	Rudder normal force
F_n	Froude number
GM	Metacentric height
f_α	Rudder lift gradient coefficient
h_R	Rudder span length
I_{zz}	Moment of inertia of ship around center of gravity of ship
J_P	Propeller advance coefficient

i_{zz}	Added moment of inertia
K	Form factor
K_T	Propeller thrust open water characteristic
L_{pp}	Ship length between perpendiculars
l_R	Effective longitudinal coordinate of rudder position
m	Ship mass
m_x, m_y	Added masses of x and y axis direction, respectively
n_P	Propeller revolution
$o-xyz$	Ship fixed coordinate system taking the origin at center of gravity of ship
$o_0-x_0y_0z_0$	Space fixed coordinate system
P	Propeller pitch
r	Yaw rate
s	Slip ratio
T	Propeller thrust
t	Time
t_P	Thrust deduction factor
t_R	Steering resistance deduction factor
U	Resultant speed
U_0	Approach ship speed (given speed)
U_R	Resultant inflow velocity to rudder
u, v	Surge velocity, lateral velocity at center of gravity, respectively
u_P	Effective inflow velocity at propeller position
u_R, v_R	Longitudinal and lateral inflow velocity components to rudder, respectively
U_{R0}	Flow velocity at the area of rudder unaffected by the

	propeller wake
U_{RP}	Flow velocity at the area of rudder affected by the propeller wake
w_P	Wake coefficient at propeller position in manoeuvring motion
w_{P0}	Wake coefficient at propeller position in straight moving
w_R	Wake coefficient at rudder position manoeuvring motion
w_R	Wake coefficient at rudder position in straight moving
X, Y, N	Surge force, lateral force, yaw moment around center of gravity of ship except added mass components
X_H, Y_H, N_H	Surge force, lateral force, yaw moment around center of gravity of ship acting on ship hull except added mass components
X_P, Y_P, N_P	Surge force, lateral force, yaw moment due to propeller
X_R, Y_R, N_R	Surge force, lateral force, yaw moment around center of gravity of ship by steering
x_G	Longitudinal coordinate of center of gravity of ship
x_H	Longitudinal coordinate of acting point of the additional lateral force component induced by steering
x_P	Longitudinal coordinate of propeller position
x_R	Longitudinal coordinate of rudder position
Y'_β, N'_β	Linear hydrodynamic derivatives with respect to lateral velocity
Y'_R, N'_R	Linear hydrodynamic derivatives with respect to yaw rate
α_R	Effective inflow angle to rudder
σ_a	Aft section fullness metric
β	Hull drift angle at center of gravity of ship
β_P	Geometrical inflow angle to propeller in manoeuvring motion

β_R	Effective inflow angle to rudder in manoeuvring motion
γ_R	Flow straightening coefficient
δ	Rudder angle
δ_R	Rudder angle where rudder normal force becomes zero
η	Ratio of propeller diameter to rudder span
Λ	Rudder aspect ratio
k	Experimental constant for expressing u_R
k_x	Acceleration rate by propeller
ψ	Yaw angle
ρ	Water density
ε	Ratio of wake fraction at propeller and rudder position



A study on the improvement of the accuracy of fishing vessels manoeuvrability prediction

Kim, Su Hyung

*Department of Navigation Science
Graduate School of
Korea Maritime and Ocean University*



Abstract

Only a few studies related to the manoeuvring characteristics of fishing vessels have been reported, because most fishing vessels are not subject to the International Maritime Organization(IMO) manoeuvrability standards. In addition, since the construction scale is smaller than that of merchant ships, empirical formulas, rather than model tests, are use to predict the manoeuvring characteristics at the design stage due to time and budget savings. Nevertheless, because no empirical formula is developed for fishing vessels, the empirical formula developed for merchant ships is applied in its place. However, since the

characteristics of hull shape parameter in particular $C_b B/L$ and dC_b/B of fishing vessels and merchant ships are clearly different, prediction errors will occur. Therefore, in this study, the modified empirical formula was derived by including the characteristic parameters of target fishing vessels in the Kijima et al.(1990) formula to improve the accuracy in predicting the manoeuvring characteristics of the target fishing vessels. Simulating the turning-motions of the target fishing vessels using the modified empirical formula yielded an average error of 6% compared with the sea trial test of full scale ships. Hence, our results reproduce the test data more accurately than the Kijima et al.(1990) formula. In the future, the modified empirical formula derived through this study will enable a prediction of the manoeuvring characteristic of fishing vessels at the design stage and an improvement in ship safety and fishing efficiency in the narrow fishing port or in the fishing ground.

KEY WORDS: Fishing vessels; Modified empirical formulas; Characteristics of hull shape parameters; Correlations

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

트롤 어선은 광범위한 수평방향에서 탐지되는 어군에 대해 적극적인 어법을 구사하며, 어획을 위하여 어군 탐지 방향으로의 대각도 선회가 수시로 필요하다. 그리고 예망하며 지나온 수역에 높은 밀도의 어군이 형성되어 있을 경우, 끌줄만 수납하고 양망하지 않은 채 180도 선회하여 지나온 항적을 재차 예망함으로써 어획률을 높일 필요가 있다. 더욱이 어군의 밀도가 높은 어장은 한정된 수역으로 밀집되어 형성되기 때문에 어군이 존재하는 위치로 선박들이 집중하여 혼잡한 상황이 발생한다. 이때 예망에 종사 중인 트롤 어선들 사이에 충돌의 위험이 상존하게 되고, 수중에서 양현 방향으로 수십 미터 이상의 소해 면적을 갖는 전개판으로 인하여 예망 중인 수중 어구 간의 걸림 등이 발생하여 선박, 인명 및 어획 손실 등이 야기될 수 있다. 따라서 트롤 어선에 대한 정확한 선회성능 정보 제공은 항해의 안전은 물론 안전조업과 어획 능률 향상에 필수 요건이라 할 수 있다.

한편, 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)에서는 1993년 11월 최소한 선박이 가진 고유한 조종성능 부족으로 인한 사고는 예방하고자 선박 조종성에 관한 잠정 기준(Interim standards for ship manoeuvrability) A.751(18)을 채택하였고, 1994년 7월 1일 이후 건조되는 선박에 적용할 것을 결의하였다(IMO A 18/Res. 751). 이후 2002년 137차 MSC(Maritime Safety Committee)에서 조종성 기준안(Table. 1)을 최종적으로 확정하여 2004년 1월 1일 이후에 건조되는 선박 중 전형적인 추진기와 조타시스템(traditional propulsion and steering systems)을 가진 길이 $100m(L_{pp})$ 이상의 동력선(e.g. shaft driven ships with conventional rudders)과 길이에 관계없이 모든 케미컬 탱커와 가스 캐리어에 적용하였다(IMO, resolution MSC.137[76]).

Table 1.1 Criteria of IMO standards

Item	Criteria
Turning ability	Advance $<4.5L$, Tac. dia. $<5.0L$
Initial turning ability	Track reach $<2.5L$, The heading has changed by 10° from the original heading in 10° rudder angle.
Yaw-checking and course-keeping abilities	<p>(1) $10^\circ / 10^\circ$ Z-test</p> <ul style="list-style-type: none"> □ 1st overshoot angle <ul style="list-style-type: none"> • 10° , if L/V is less than 10s. • 20° , if L/V is 30s or more; and • $(5+1/2(L/V))^\circ$, if L/V is 10s or more, but less than 30s. □ 2nd overshoot angle <ul style="list-style-type: none"> • 25° , if L/V is less than 10s. • 40° , if L/V is 30s or more; and • $(17.5+0.75(L/V))^\circ$, if L/V is 10s or more, but less than 30s. <p>(2) $20^\circ / 20^\circ$ Z-test</p> <ul style="list-style-type: none"> □ 1st overshoot angle $<25^\circ$
Stopping ability	Track reach $<15L$, However, this value may be modified by the Administration, but should in no case exceed $20L$.

단, Table 1.1에서 조종성 평가는 아래와 같은 조건에서 수행된다.

- 심수이며, 제한수역이 아닐 것(deep, unrestricted water).
- 해면상태가 평온할 것(calm environment).
- 만재(하계만재흘수), 등흘수 상태일 것(full load[summer load line draught], even keel condition).
- 시험 속도에 근접한 상태일 것(steady approach at the test speed).

이와 같은 IMO 조종성 기준안의 최종 확정에는 국내·외 연구자들로 하여금 선박의 조종성능에 관한 연구를 활발히 하게 되는 계기가 되었으며, 특히, 선박의 고유한 조종성능은 선형 요소나 타의 특성에 따라 대부분 결정되기 때문에 설계 단계에서의 조종성능 추정 연구에 대한 관심이 더욱 높아졌다.

현재 선박 설계 실무에서는 주로 수치 시뮬레이션 방법 중의 하나인 모형시험의 누적 결과를 회귀분석한 추정 근사식(이하 경험식이라 한다.) 또는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 기반으로 선박의 조종성능을 추정하고 있으며, 이러한 방법을 통해 도출한 조종 유체력 미계수 값을 이용하면 대상 선박의 조종성능을 정량적으로 추정할 수 있기 때문에 간접적인 조종성능 평가가 가능해진다(Lee et al. 2018).

그러나 상기와 같은 설계 단계에서의 선박 조종성능 추정에 관한 연구는 IMO 조종성 기준의 적용 대상인 대형 상선 선형을 중심으로 이루어지고 있으며, 대부분이 길이 $100\text{m}(L_{pp})$ 미만으로써 적용 대상에서 제외되는 어선 선형에 관한 연구는 국내·외적으로 찾아보기 어려웠다.

한편, 어선의 선사들은 상선의 선사들에 비해 일반적으로 영세하기 때문에 시간과 비용의 절감 차원에서 모형시험보다는 경험식을 이용하여 설계 단계에서의 조종성능을 추정할 수 있도록 배려할 필요가 있다. 하지만, 상선 선형을

대상으로 개발된 경험식을 보정 없이 적용할 경우 모형시험의 회귀분석 결과로 구성되는 경험식의 특성상 추정오차를 발생시킬 수 있으므로, 어선의 선형 특성을 나타내는 계수들의 값을 보정하여 어선 선형에 적용 가능한 보정 경험식을 도출할 필요가 있다.

1.2 연구 동향 및 목적

최근 20년 동안 어선 조종성능에 관련된 국내 연구로는 실습선을 대상으로 Z(Zig-Zag) 시험을 수행하고, 충돌과 좌초 상황에 대한 추종성과 선회성을 평가한 연구(Kim, 1979; Song et al., 2015), 예망 중인 중층 트롤 어선의 조종성능을 분석하고, 예망 침로를 위한 변침용 곡선도를 도출한 연구(Kim, 1993), 990톤 급 실습선을 대상으로 부표 방위반법과 DGPS(Differential Global Positioning System)를 이용하여 조종성능을 측정하고 결과를 비교한 연구(Ahn et al., 2001), 1,700톤 급 실습선을 대상으로 충돌회피 동작이나 좁은 해역에서 선속과 타각에 따른 선회권을 정량적으로 파악하고, 선회 특성을 분석한 연구(Kim et al., 2005), 일본과 국내의 소형어선을 비교하고, 저항 성능 변화를 통한 선형 개선 방향에 관한 연구(Jee et al., 2009), 선망어선의 선수 및 선미를 개조하고, 저항 및 실선 시험을 수행하여 조업 능력 향상 여부를 고찰한 연구(Hong, 2012), 그 밖의 상기와 유사한 어업 실습선의 조종성능에 관한 연구(Park et al., 1998; Jeong et al., 1998; Ahn et al., 2001; An et al., 2005; Kim et al., 2009) 등 특정한 실선의 조종성능을 분석하는 연구가 대부분이며, 설계 단계에서부터 어선 조종성능을 추정한 연구는 찾아보기 어려웠다.

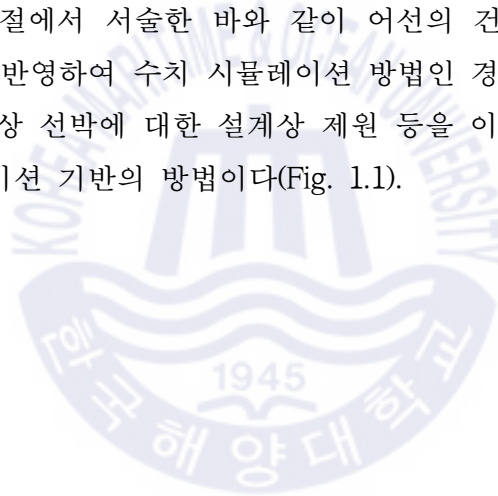
국외 연구로는 소형 어선에 대하여 실험적 방법으로 유체력 미계수를 도출하고, 그 값을 이용하여 조종성능을 추정한 연구(Dan et al., 2010), 길이에 비하여 선속이 빠른 선박 즉, 프루드 수(F_n , Froude number)가 높은 중고속선이나 어선을 대상으로 경험식을 이용한 조종 유체력 미계수 값을 도출하고, 선회성능을 추정하여 자유 항주 시험 등과 비교 분석한 연구(Yoshimura et al., 2002; 2003; 2010) 등 간혹 어선의 조종성능을 추정한 연구가 수행되었다. 그러나 이러한 연구 역시 꾸준히 이어지지 않았고, 제한된 선형에 관한 연구로 이루어

졌기 때문에 트롤 어선 선형의 조종성능 추정에 적용하기에 다소 신뢰성 있는 결과를 기대하기는 어려울 것으로 판단되었다.

따라서 본 연구는 상기의 연구 배경 및 동향을 바탕으로 트롤 어선 선형에 적용 가능한 경험식을 제안함으로써 설계 단계에서 트롤 어선 선형의 선회성능 추정에 대한 정도를 향상시키고, 보다 정확한 선회성능에 관한 정보를 제공함으로써 안전항해와 조업 및 어획 능률 향상에 기여할 수 있는 기초연구를 수행하고자 한다.

1.3 연구 내용 및 한계

본 연구에서는 1.1절에서 서술한 바와 같이 어선의 건조 규모와 예산 문제 등 현실적인 상황을 반영하여 수치 시뮬레이션 방법인 경험식을 대상으로 선정하였다. 경험식은 대상 선박에 대한 설계상 제원 등을 이용하여 조종성능을 추정하는 수치 시뮬레이션 기반의 방법이다(Fig. 1.1).



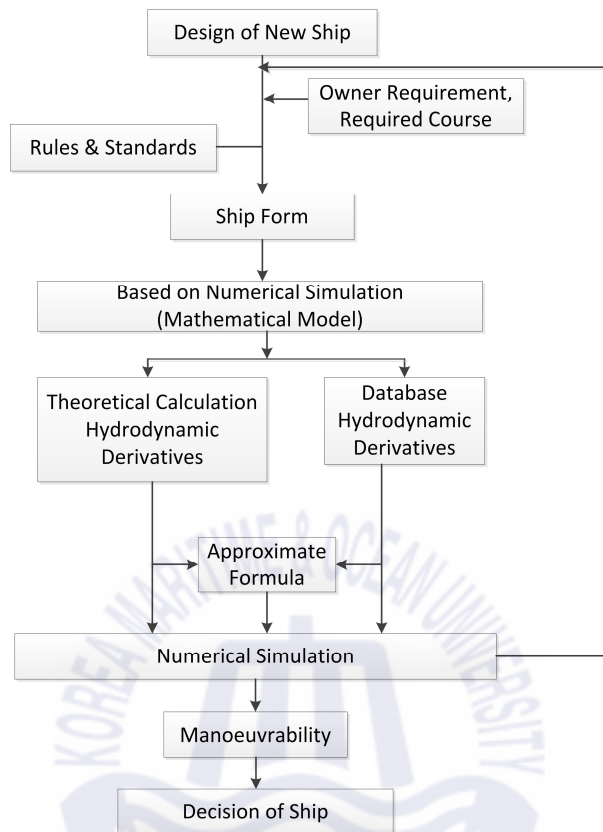


Fig. 1.1 Flow charts for evaluation for ship manoeuvrability (Kijima 1995)

이는 모형시험의 결과보다 정확성은 떨어지지만 선형이 제대로 정해지지 않은 초기 설계 단계 뿐 아니라, 건조 후에도 해당 선박이 처해진 상황에 따른 조종운동을 비교적 쉽고 빠르게 추정할 수 있는 장점이 있다(Kijima 1995).

본 연구에서 선정한 경험식은 조종 유체력 미계수를 도출하는 다항식이 명확하게 공개되어 있으며, 선미 형상을 고려하지 않은 식(Kijima et al., 1990)과 고려한 식(kijima and Nakiri, 1999; 2003)으로 나누어져 여러 경우의 적용 가능한 폭을 가진 Kijima et al. 경험식(또는 Formula 1990, 1999, 2003이라 한다.)을 채택하였다.

논문의 구성은 아래와 같은 순서로 수행하였고, Fig. 1.2와 같이 나타내었다.

제1장은 연구의 필요성에 대한 배경과 내용의 흐름을 이해하기 쉽도록 간략한 구성을 제시하였다.

제2장은 Kijima et al. 경험식을 개발하는데 사용되었던 수학적모델인 MMG(Mathematical Modeling Group)의 분리 수학적모델(modular type)을 제시하고, Formula 1990, 1999, 2003을 비롯하여 본 연구에서 이용하였던 모든 식을 열거하였다.

제3장은 Kijima et al. 경험식을 트롤 어선 선형에 적용하였을 경우의 유효성 유무를 확인하기 위하여 대상 어선을 선정하였고, Formula 1990, 1999, 2003 각각으로부터 조종 유체력 미계수 값을 도출하여 선회운동 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 그 결과를 실선 선회권 시험 결과와 비교하여 근사 정도를 확인하였다.

제4장은 3장에서 수행한 유효성 검증의 결과로부터 선정된 Formula 1990을 트롤 어선 선형에 적용함에 있어서 추정의 정도를 높이기 위하여 다음의 과정을 통한 보정 경험식을 도출하였다. 먼저, 대상 어선과 상선을 선정하여 Formula 1990으로부터 조종 유체력 미계수 값을 도출하였다. 그리고 조종 유체력 미계수 값을 도출하는 과정에서 높은 상관관계를 가지는 선형 특성 계수와 상관시켰다. 이후, 어선과 상선 선형이 다소 차이를 나타내는 계수 값의 범위를 추세식을 이용하여 보정함으로써 보정 경험식을 도출하였다.

제5장은 보정 경험식의 유효성을 검증하기 위하여 3장에서 선정하였던 대상 어선의 조종 유체력 미계수 값을 보정된 경험식을 이용하여 새로이 도출하였다. 도출한 값을 이용하여 선회운동 시뮬레이션을 수행하고, 그 결과를 Formula 1990과 실선 시험의 결과와 비교, 분석하여 유효성 유무를 검증하였다.

제6장은 결론으로써 본 연구의 수행 결과를 요약하였고, 트롤 어선 선형의 조종성능 추정 연구에 대한 방향을 제시하였다.

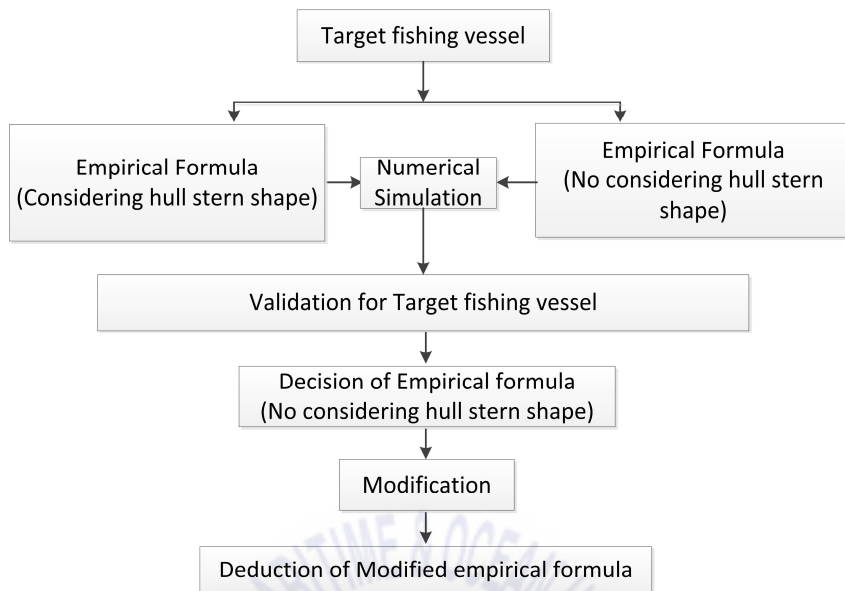


Fig. 1.2 Flow charts for deduction of modified empirical formula

본 연구는 위와 같은 방법으로 연구를 수행함에 있어서 아래의 세 가지 한계에 따른 추정오차를 가진다.

첫째, 대상 어선이 선미식 트롤 어선(어업 실습선)에 제한되었다. 따라서 미세한 선형 차이에도 변하는 조종 유체력 미계수 값과 그에 따른 조종 특성의 변화를 고려하였을 때, 본 논문에 주어진 제원 이외의 선형을 가진 어선에 적용하였을 경우에는 미소한 추정 오차가 발생할 것으로 판단된다.

둘째, 본 연구는 트롤 어선 선형의 모형시험 결과를 경험식에 포함하여 보정한 것이 아닌, 제원이 나타내는 특성 계수를 추가하여 보정되었기 때문에 모형시험의 결과만큼 정도 높은 추정 결과를 기대하기 어렵다.

셋째, 연구를 수행함에 있어서, 외력, 트림 등이 실선 시험과 수치 시뮬레이션의 조건이 미소한 차이를 나타내었으며, 이 역시 추정 오차를 발생시킨다. 한편, 현재까지도 외력, 트림 등을 고려한 경험식은 오히려 고려하지 않은 경험식

보다 추정의 정도가 낮은 경향이 있기 때문에 본 연구에서도 외력과 트림은 고려하지 않았다.



제 2 장 조종운동 수학모델

선박의 조종운동 시뮬레이션을 표현하기 위한 수학모델은 유체력을 표현하는 방법에 따라 전선 모델(Whole ship model)과 분리형 모델(Modular type model)로 구분한다(ITTC, 2002). 전선 모델은 선체, 프로펠러, 타를 함께 포함하여 하나의 선체로 보고 모델링을 하는 방식으로 Abkowits 모델(Abkowits, 1964)이라고도 한다. 분리형 모델은 선체, 프로펠러, 타에 작용하는 유체력을 분리하여 모델링 하는 방식으로써, 1970년대 후반 조종운동 모델링 그룹(Manoeuvring Modeling Group)이라고 불리는 일본 수조시험 연구회의(Japanese Towing Tank Conference, JTTC)에 의해 제안되었다. 이는 1977년 일본 조선학회(Bulletin of Society of Naval Architects of Japan)를 통해 그 개념이 보고되었으며(Ogawa et al., 1977), 이후 Ogawa and Kasai(1978), Matsumoto and Suemitsu(1980), Inoue et al.(1981)에 의해서 선체에 작용하는 유체력을 표현하는 방법들을 포함하여 나타내어졌다(Yasukawa and Yoshimura, 2015).

본 연구에서는 조종운동 수학모델을 Kijima et al. 경험식 도출의 기반이 된 MMG 모델을 이용하였으며, 이는 하나의 프로펠러와 타를 가진 선박에 적용되고 아래와 같은 가정 하에 이루어진다(Yasukawa and Yoshimura, 2015).

- 선체는 강체로 이루어져있다.
- 선체에 작용하는 유체력은 준정적(quasi-steady)으로 처리된다.
- 횡 방향 속도 성분의 크기는 종 방향 속도 성분에 비하여 충분히 작다.
- 선체의 속도는 조파(wave-making)의 영향이 무시될 수 있을 정도로 빠르지 않다.
- \overline{GM} 은 충분히 커서 좌우동요 연성(roll coupling) 효과가 조종운동에 영향을 미치지 않는다.

2.1 좌표계

Fig. 2.1은 선박의 조종운동을 표현하기 위하여 오른손 직교 좌표계를 사용한 예이다. 지구 고정 좌표계($o_0 - x_0y_0z_0$) 위에 선체의 중심 o 를 좌표계 원점에 위치시킨 선체 고정 좌표계($o - xyz$)를 나타내었다. 여기서, $x_0 - y_0$ 평면은 정수면과 일치하고, z_0 축은 연직 아래 방향을 가리킨다. 그리고 x , y , z 축은 각각 선수, 우현 및 연직 아래 방향이 양의 방향을 나타낸다. 또한, 선수각 ψ 는 x_0 축과 x 축 사이의 각으로 정의할 수 있다. 선체의 중심에 대하여 나타나는 편류각 β 와 합속도 U 는 각각 $-\sin^{-1}(v/U)$, $\sqrt{u^2 + v^2}$ 으로 정의된다. u 와 v 는 각각 x , y 축 방향의 속도 성분을 나타내고, δ 는 타각, r 는 각속도를 나타낸다.

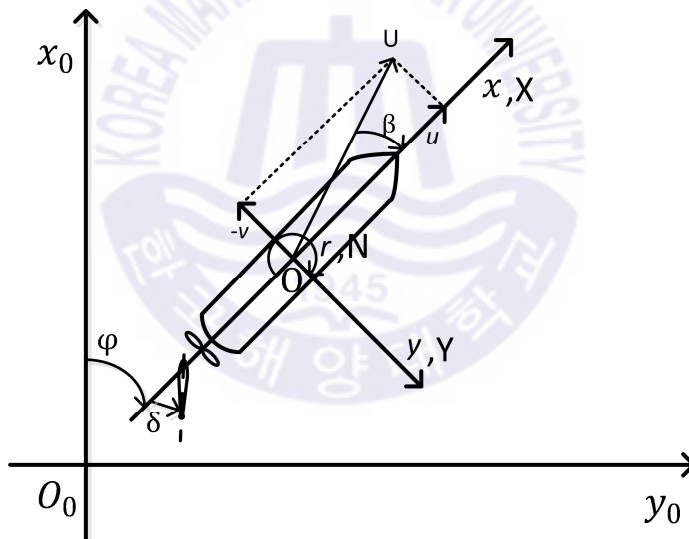


Fig. 2.1 Coordinate systems

2.2 조종운동 방정식

$x_0 - y_0$ 평면 위에 선체의 중심 o 는 기준 시간 t_0 에서 선박의 무게중심과 일치한다. 즉, 정수 면을 달리는 수상선의 무게중심의 자취는 어떤 시간 t 에서도

수평면 $x_0 - y_0$ 에 놓일 것이 분명하기 때문에 기준 시간 $t = t_0$ 이후의 선박의 운동은 좌표 x_{0G} 와 y_{0G} 그리고 선수각 ψ 에 의해 완전히 정의된다. 이와 같이 지구 위에 고정된 축에 관한 선박의 운동은 식 (1)과 같이 Newton의 방정식으로 나타낼 수 있다(Yim, 1989).

$$m\ddot{x}_{0G} = X_0 \quad (1)$$

$$m\ddot{y}_{0G} = Y_0$$

$$I_{zz}\ddot{\psi} = N$$

여기서, m 은 선체의 질량을 나타내며, I_{zz} 는 z 축 주위의 질량 관성모멘트를 나타낸다. 식 (1)을 사용하여 간단하게 나타낼 수 있으나, 운동하는 선박에 고정된 x 축과 y 축을 사용하면 원점 o 가 시간 t 에 관계없이 항상 그 선박의 무게 중심 위치에 있기 때문에 선박의 운동을 더욱 편리한 꼴로 나타낼 수 있다. 따라서 지구에 고정된 좌표계에 관한 식 (1)을 움직이는 선박에 고정된 좌표계에 관한 식으로 변환하기 위하여 x 와 y 방향의 힘 X 와 Y 를 x_0 와 y_0 방향의 힘 X_0 와 Y_0 항으로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$X_0 \cos \psi + Y_0 \sin \psi = X \quad (2)$$

$$Y_0 \cos \psi - X_0 \sin \psi = Y$$

마찬가지로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u \cos \psi - v \sin \psi = \dot{x}_{0G} \quad (3)$$

$$u \sin \psi + v \cos \psi = \dot{y}_{0G}$$

식 (1) ~ (3)에서 위첨자 (\cdot) 는 그 양을 시간에 관하여 미분했다는 뜻이며, u 와 v 는 각각 U 의 x 와 y 방향 성분들이다. 식 (3)을 시간 t 에 관하여 다시 한

변 미분하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{u}\cos\psi - \dot{v}\sin\psi - (u\sin\psi + v\cos\psi)\dot{\psi} = \ddot{x}_{0G} \quad (4)$$

$$\dot{u}\sin\psi + \dot{v}\cos\psi + (u\cos\psi - v\sin\psi)\dot{\psi} = \ddot{y}_{0G}$$

식 (4)를 식 (1)에 대입하여 얻어지는 X_0 와 Y_0 의 값을 식 (2)에 넣으면 아래의 식 (5)와 같다.

$$m(\dot{u} - v\dot{\psi}) = X \quad (5)$$

$$m(\dot{v} + u\dot{\psi}) = Y$$

상기와 같은 식을 이용하여 $x_0 - y_0$ 평면에서의 선박 3자유도 운동인 전후동요(Surge), 좌우동요(sway), 선수동요(Yaw)를 표현할 수 있으며, 부가 질량과 부가 관성모멘트를 포함한 선박 조종운동 방정식은 아래의 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$(m + m_x)\dot{u} - (m + m_y)v\dot{r} = X \quad (6)$$

$$(m + m_y)\dot{v} + (m + m_x)u\dot{r} = Y$$

$$(I_{zz} + i_{zz})\dot{r} = N$$

여기서, m_x 와 m_y 는 각각 x 축, y 축 방향의 부가 질량을 나타내며, i_{zz} 는 z 축 주위의 부가 관성모멘트를 나타낸다. 또한, Kijima et al. 경험식을 표현하기 위하여 선수각 ψ 를 시간에 관하여 미분한 각속도 r 를 사용하여 나타내었다.

Kijima et al.(1990)은 식 (6)을 편류각 β 와 r 를 이용하여 나타내었으며, 각 항에 제시된 차원이 다른 변수들의 연산을 가능할 수 있도록 식 (7)과 같이 무차원화 하였다.

$$\begin{aligned}
& (m' + m'_x) \left(\frac{L_{pp}}{U} \right) \left(\frac{\dot{U}}{U} \cos \beta - \dot{\beta} \sin \beta \right) + (m' + m'_y) r' \sin \beta = X' \\
& - (m' + m'_y) \left(\frac{L_{pp}}{U} \right) \left(\frac{\dot{U}}{U} \sin \beta + \dot{\beta} \cos \beta \right) + (m' + m'_x) r' \cos \beta = Y' \\
& (I'_{zz} + i'_{zz}) \left(\frac{L_{pp}}{U} \right)^2 \left(\frac{\dot{U}}{L} r' + \frac{U}{L} \dot{r}' \right) = N'
\end{aligned} \tag{7}$$

여기서, 위첨자 (')은 무차원화 된 계수를 나타내며, $u = U \cos \beta$, $v = -U \sin \beta$, $\beta = -\sin^{-1}(v/U)$ 로 표현할 수 있다. 무차원화는 식 (8)과 같은 방법으로 실시하였다.

$$r' = r(L_{pp}/U) \tag{8}$$

$$m', m'_x, m'_y = m, m_x, m_y / \frac{1}{2} \rho L_{pp}^2 d$$

$$I'_{zz}, i'_{zz} = I_{zz}, i_{zz} / \frac{1}{2} \rho L_{pp}^4 d$$

$$X', Y' = X, Y / \frac{1}{2} L_{pp} d U^2$$

$$N' = N / \frac{1}{2} \rho L_{pp}^2 d U^2$$

앞서 서술한 바와 같이 본 연구에서는 조종운동 수학모델을 Kijima et al.(1990; 1999; 2003) 경험식 도출의 기반이 된 MMG 모델을 이용하였으며, 식 (6) 우변의 외력항 X, Y, N 을 선체, 방향타 및 프로펠러 성분으로 나누어 표현하면 아래의 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$X = X_H + X_R + X_P \tag{9}$$

$$Y = Y_H + Y_R$$

$$N = N_H + N_R$$

여기서, 아래첨자 H , R , P 는 각각 선체, 방향타, 프로펠러를 나타낸다.

2.2.1 선체에 작용하는 힘과 모멘트

일반적으로 선체에 작용하는 힘 X_H , Y_H 와 모멘트 N_H 는 구속 모형시험 등 기존의 경험을 바탕으로 기본 운동방정식의 운동변수 u, v, r 의 다항식으로 표현된다. Kijima et al.(1990)은 식 (10)과 같이 부가 질량 항을 좌변에 포함시키고, 편류각 β 와 무차원화된 각속도 r' 를 이용한 다항식으로 나타내었다 (Kobayashi et al., 1995). 이와 같은 다항식의 계수들을 유체력 미계수라 칭하며, 교차 도함수를 $\frac{\partial Y}{\partial r} = Y_r$, $\frac{\partial^2 X}{\partial \beta \partial r} = X_{\beta r}$ 등과 같이 간소화하여 표시하였다.

$$X_H = \frac{\rho}{2} L_{pp} dU^2 (X'_{\beta r} r' \sin \beta + X'_{uu} \cos^2 \beta) \quad (10)$$

$$Y_H = \frac{\rho}{2} L_{pp} dU^2 (Y'_{\beta} \beta + Y'_r r' + Y'_{\beta \beta} \beta |\beta| + Y'_{rr} r' |r'| + (Y'_{\beta \beta r} \beta + Y'_{\beta rr} r') \beta r')$$

$$N_H = \frac{\rho}{2} L_{pp}^2 dU^2 (N'_{\beta} \beta + N'_r r' + N'_{\beta \beta} \beta |\beta| + N'_{rr} r' |r'| + (N'_{\beta \beta r} \beta + N'_{\beta rr} r') \beta r')$$

2.2.2 프로펠러에 작용하는 힘

프로펠러에 작용하는 힘은 보통 전후 방향의 힘 X_P 이며, 좌우 방향의 힘 Y_P 와 모멘트 N_P 는 미소하다는 가정 하에 생략하면 식 (11)과 같다.

$$X_P = (1 - t_P) T = \rho D_P^4 n_P^2 (1 - t_P) K_T \quad (11)$$

여기서, t_P 는 추력 감소 계수, T 는 프로펠러 추력, D_P 는 프로펠러 직경, n_P

는 프로펠러 회전 수, K_T 는 프로펠러 추력 계수를 나타낸다.

이때, 프로펠러 추력 계수 K_T 는 전진계수 J_P 의 2차 다항식으로써 식 (12)과 같이 대략적으로 나타낼 수 있다.

$$K_T(J_P) = C_1 + C_2 J_P + C_3 J_P^2 \quad (12)$$

여기서, C_1, C_2, C_3 는 프로펠러 특성에 관한 계수(상수), J_P 는 프로펠러 전진 계수 $\left(= \frac{u_P}{n_P D_P}\right)$ 이다. 비록, 조종운동 중 프로펠러는 직진 중인 경우보다 복잡한 사류 속에 있지만, 프로펠러 유입 속도로 축 방향 성분을 취하면 직진 중인 프로펠러의 특성을 그대로 사용할 수 있기 때문에 프로펠러의 유효 유입 속도는 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다(Kobayashi et al., 1995).

$$u_P = u(1 - w_{P0}) \quad (13)$$

여기서, w_{P0} 는 프로펠러 위치에서의 유효 반류계수이며 프로펠러 좌·우의 비대칭성, 하중 정도 또는 선형 특성 등으로 인해 일반적으로 조종운동 중 변화한다. 따라서 이 계수에 관련된 식들은 여러 가지가 존재하지만, 이 논문에서는 편류각 β 와 무차원화된 각속도 r' 의 함수로 표현하여 Kijima et al.(1990; 1999; 2003) 경험식에 사용된 식 (14)를 선정하였다(Kijima et al., 1990).

$$w_P = w_{P0} \exp(-4.0\beta_P^2) \quad (14)$$

$$\beta_P = \beta - x_P' r'$$

여기서, w_{P0} 는 직진 운동 중 프로펠러 위치에서의 유효 반류계수, β_P 는 조종운동 중 프로펠러에 대한 기하학적 유입 각, x_P' 는 프로펠러 위치의 무차원화된 종 축 좌표(≈ -0.5)이다.

2.2.3 타에 작용하는 힘과 모멘트

타에 작용하는 힘 X_R , Y_R 와 모멘트 N_R 는 일반적으로 Fig. 2.2와 같이 프로펠러에 의해 가속된 후류에서 타에 해당하는 선체 길이 방향의 주류에 선회운동에 의해 타에 유입되는 사류 성분이 더해진 유동장을 타에 대한 유입 속도와 유입 각으로써 모델링 하여, 식 (15)과 같이 나타낼 수 있다(Kobayashi et al., 1995).

$$X_R = -(1 - t_R) F_N \sin \delta \quad (15)$$

$$Y_R = -(1 + a_H) F_N \cos \delta$$

$$N_R = -(x_R + a_H x_H) F_N \cos \delta$$

여기서, t_R , a_H , x_H 는 타에서 선체와 프로펠러에 미치는 주요 간섭 계수이다.

t_R 은 조타 저항 감소 계수으로써, $F_N \sin \delta$ 에 대한 타 저항 감소 계수로 정의되며, F_N 의 종축 방향 성분을 의미한다. 실제 X_R 는 조타에 따른 프로펠러 추력 변화 성분을 포함하기 때문에 t_R 은 조타에 의한 타 저항 감소와 프로펠러 추력의 증가 모두를 의미한다. a_H 는 타력 증가 계수으로써, 조타 실시 중 $F_N \cos \delta$ 에 대한 선체에 작용하는 횡력 계수로 정의되며, F_N 의 횡축 방향 성분을 의미한다. 수조 실험에서 a_H 의 크기는 거의 0.3~0.4 정도이며(Kose et al., 1981), 이는 조타 실시 중 선체에 작용하는 횡력이 타 직압력 성분보다 30~40% 크다는 것을 의미한다. x_H 는 부가 횡력 성분의 종축 방향 작용점으로 정의되며, 측정값은 거의 $-0.45L_{PP}$ 정도로 선미 부근에서 작용한다. x_R 는 무게중심으로부터 타 위치까지의 종축 좌표이며 대략 $-0.5L_{PP}$ 이다. 또한, 타판에 작용하는 무차원화된 직압력 F'_N 는 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F'_N = (A_R / L_{pp} d) f_\alpha U_R'^2 \sin \alpha_R \quad (16)$$

$$f_\alpha = 6.13 \Lambda / (\Lambda + 2.25)$$

$$U_R'^2 = (1 - w_{R0})^2 \{1 + C \cdot g(s)\}$$

$$g(s) = \eta k \{2 - (2 - k)s\} s / (1 - s)^2$$

$$\eta = D_P / h_R$$

$$k = 0.6(1 - w_{P0}) / (1 - w_{R0})$$

$$s = 1 - (1 - w_{P0}) U \cos \beta / nP$$

$$w_R = w_{R0} \cdot w_P / w_{P0}$$

$$\alpha_R = \delta - \gamma_R \cdot \beta'_R$$

$$\beta'_R = \beta - 2x'_R \cdot r'$$

$$x'_R \approx -0.5$$

여기서, $A_R / L_{pp} d$ 는 타 면적비, Λ 는 타 종횡비를 나타낸다. 따라서 타에 유입되는 합속도인 유효 유입 속도 U_R 과 유효 유입 각 α_R 는 아래의 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_R = \sqrt{u_R^2 + v_R^2} \quad (17)$$

$$\alpha_R = \delta - \tan^{-1} \left(\frac{v_R}{u_R} \right) \approx \delta - \frac{v_R}{u_R}$$

식 (17)에서 유효 유입 속도 U_R 은 프로펠러의 후류에 의해 가속되는 부분과 가속되지 않는 부분으로 나누어 생각할 수 있으며, 먼저, 프로펠러 후류를 받지 않는 부분의 타 위치 유속 u_{R0} 는 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_{R0} = (1 - w_{R0})u = \varepsilon u_P \quad (18)$$

여기서, w_{R0} 는 타 위치에서의 유효반류계수, $u_P = (1 - w_{P0})u$, ε 은 프로펠러와 타 위치에서의 반류계수의 비 $\left(\varepsilon = \frac{1 - w_{R0}}{1 - w_{P0}}\right)$ 를 나타낸다. 또한, 프로펠러의 후류를 받아 가속된 유속 u_{RP} 는 식 (19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u_{RP} = u_{R0} + k_x \Delta u = u_{R0} + k_x (n_P P - u_P) = \varepsilon u_P \left\{ 1 + k \left(\sqrt{1 + \frac{8K_T}{\pi J_P^2}} - 1 \right) \right\} \quad (19)$$

여기서, k_x 는 프로펠러에 의한 증속율(k_x 는 $0.5 \leq k_x \leq 1.0$ 이나, 실제로는 유체의 점성에 의한 후류의 확산을 고려하여, 1축 1타선의 경우 $k_x \approx 0.6$ 을 취한다.), Δu 는 무한 원방에서의 증속된 유속, $n_P P = u_P \sqrt{1 + \frac{8K_T}{\pi J_P^2}}$, $k = \frac{k_x}{\varepsilon} \approx \frac{0.6}{\varepsilon}$ 를 나타낸다. 보통 타의 높이는 프로펠러의 직경보다 크고, 프로펠러의 후류를 받는 부분과 받지 않는 부분으로 나뉘므로써, 두 종류 유속의 단순 가중평균을 취하여 타의 축 방향 유효 유입 속도 u_R 을 나타내면 식 (20)과 같다.

$$u_R = \sqrt{\frac{A_{R1}}{A_R} u_{RP}^2 + \frac{A_{R2}}{A_R} u_{R0}^2} \approx \sqrt{\eta u_{RP}^2 + (1 - \eta) u_{R0}^2} \quad (20)$$

여기서, $\eta = \frac{D_P}{h_R} \approx \frac{A_{R1}}{A_R}$, $A_R = A_{R1} + A_{R2}$, A_{R1} 은 프로펠러 후류의 영향을 받는 타의 면적, A_{R2} 는 프로펠러 후류의 영향을 받지 않는 타의 면적, h_R 는 타 높이를 나타내며, u_R 은 식 (21)과 같이 고쳐 나타낼 수 있다.

$$u_R = \varepsilon u_P \sqrt{\eta \left\{ 1 + k \left(\sqrt{1 + \frac{8K_T}{\pi J_P^2}} - 1 \right) \right\}^2 + (1 - \eta)} \quad (21)$$

한편, 식 (21)은 프로펠러 단독특성($(K_T \sim J_P)$ 곡선)이 알려져 있지 않으면 사용할 수 없으므로, u_{RP} 를 프로펠러 슬립비(slip ratio) s 를 써서 나타내면 식 (22)와 같다.

$$u_{RP} = u_P \left\{ \varepsilon + k_x \left(\frac{nP}{u_P} - 1 \right) \right\} = \varepsilon u_P \left(1 + k \frac{s}{1-s} \right) \quad (22)$$

여기서, $s = 1 - \frac{u_P}{nP}$ 이다. 따라서 식 (18)과 (22)를 식 (20)에 대입하여 아래의 식 (23)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} u_R &= \varepsilon u_P \sqrt{\eta \left(1 + k \frac{s}{1-s} \right)^2 + (1 - \eta)} \\ &= \frac{\varepsilon u_P}{1-s} \sqrt{\eta (1-s+ks)^2 + (1-\eta)(1-s)^2} \\ &= \frac{\varepsilon u_P}{1-s} \sqrt{1-2(1-\eta k)s + \{1-\eta k(2-k)\}s^2} \\ &= \varepsilon nP \sqrt{1-2(1-\eta k)s + \{1-\eta k(2-k)\}s^2} \\ &= u(1-w_{R0}) \sqrt{1+g(s)} \end{aligned} \quad (23)$$

여기서, $g(s) = \frac{\eta k \{2 - (2-k)s\}s}{(1-s)^2}$ 이며, 식 (23)은 타 위치에서의 전후방향 유속 u_R 를 구하는 중요한 식이다. 다음으로 유효 유입 각 a_R 중에서 횡 방향 유속 v_R 은 선체운동 변수 v 와 r 를 이용하여 식 (24)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v_R = -\gamma_R(v + l_R r) \quad (24)$$

여기서, γ_R 은 정류계수(flow straitening coefficient), l_R 은 무게중심으로부터 타 중심까지의 수평거리(실험정수, 음[-]의 값)이다. 일반적으로 $u_R \gg v_R$ 이므로,

$$\begin{aligned} a_R &\approx \delta - \frac{v_R}{u_R} \\ &= \frac{\delta + \gamma_R(v + l_R r)}{u_R} \\ &= \delta - \gamma_R \left(\frac{U}{u_R} \right) (\beta - l'_R r') \end{aligned} \quad (25)$$

여기서, $l'_R = \frac{l_R}{L_{pp}} (l'_R \approx -0.9 \sim -1.0)$ 이다. 또한, 식 (25)를 아래의 식 (26)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} a_R &= \delta - \gamma_R \left(\frac{U}{u_P} \right) \left(\frac{u_P}{u_R} \right) (\beta - l'_R r') \\ &= \delta - \gamma (\beta - l'_R r') \end{aligned} \quad (26)$$

여기서, $\gamma = C_S \cdot C_P$, $\gamma = \gamma_R \left(\frac{U}{u_R} \right)$, $C_S = \gamma_R \left(\frac{U}{u_P} \right)$, $C_P = \frac{u_P}{u_R}$ 이며, C_S 는 선체 정류계수, C_P 는 프로펠러 정류계수이다. 또한, 정류계수 γ 의 실험적 결정 방법으로는 β 와 r' 로써 선체가 조종운동 중 일 때, 타 직압력이 0이 되는 타각 δ_R 을 구하게 되면 아래의 식 (27)로부터 γ 을 구할 수 있다.

$$\delta_R = \gamma (\beta - l'_R r') \quad (27)$$

2.3 경험식

2.3.1 선미 형상을 고려하지 않은 경험식

선미 형상을 고려하지 않은 Formula 1990(Kijima et al., 1990)은 상선 13척(Container ship 2척, Cargo ship 3척, LNG 1척, VLCC 2척, ULCC 3척, Car carrier 1척, RO/RO 1)의 구축 모형시험을 통하여 도출되었으며, 초기 설계 단계에서 선박이 가진 주요 제원을 이용하여 조종성능을 추정한다. 이 식은 심수에서의 선박 조종성능 추정에 적합하며, 전통적인 선체 형상을 가진 선박, 특히, 전통적인 선미 형상을 가진 선박에 적용하였을 경우에 효과적이다(Kijima et al., 1990). 등흘수(even keel) 상태에서 선체에 작용하는 힘인 횡력(lateral force)과 선수동요(yaw moment)에 대한 미계수(derivatives)를 도출하는 방법은 식 (28)과 같다.



$$Y'_\beta = \frac{1}{2}\pi k + 1.4C_b B/L \quad (28)$$

$$Y'_r - (m' + m'_x) = -1.5C_b B/L$$

$$Y'_{\beta\beta} = 2.5d(1 - C_b)/B + 0.5$$

$$Y'_{rr} = 0.343dC_b/B - 0.07$$

$$Y'_{\beta rr} = 5.95d(1 - C_b)/B$$

$$Y'_{\beta\beta r} = 1.5dC_b/B - 0.65$$

$$N'_\beta = k$$

$$N'_r = -0.54k + k^2$$

$$N'_{\beta\beta} = -0.96d(1 - C_b)/B + 0.066$$

$$N'_{rr} = 0.5C_b B/L - 0.09$$

$$N'_{\beta rr} = -(0.5dC_b/B - 0.05)$$

$$N'_{\beta\beta r} = -\{57.5(C_b B/L)^2 - 18.4C_b B/L + 1.6\}$$

여기서, C_b 는 방형 비척 계수, L 은 선체길이($=L_{pp}$), B 는 전폭, d 는 흘수, $k(=2d/L_{pp})$ 는 선체 비율을 나타낸다.

일반적으로 유체력 계수 중에서 가장 복잡하고, 추정하기 힘든 계수는 선체, 프로펠러, 타 사이에서 작용하는 간섭 계수로써 a_H , x_H , w_R , w_P , γ 등이 있다. 특히, 설계 단계에서는 이 계수들의 정도 높은 추정이 더욱 어렵기 때문에 동일하거나 유사한 선형을 가진 선박의 고유한 조종성능을 고려하여 추정하고 있으며, 이 경험식에서도 역시 자유 항주 시험(free running model test)과 구속 모형시험(captive model test) 등의 모형시험의 결과로부터 가정되었다(Kijima et al., 1990).

먼저, 타력증가계수 a_H 와 무차원화된 부가 횡력의 종축 방향 작용점 x'_H 는 Fig. 2.2와 같이 C_B 에 대한 함수로써 가정하였다.

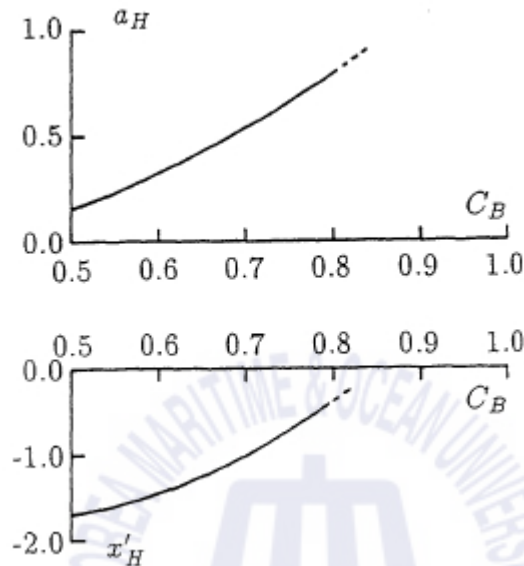


Fig. 2.2 Interaction coefficients of a_H and x'_H (Kijima et al., 1990)

수조시험에 의하면 a_H 의 크기는 0.3~0.4 정도이며, 이것은 조타의 증가에 의하여 작용하는 횡 방향 힘은 직압력 성분보다 30~40% 정도 크다는 것을 의미한다(Kose et al., 1981). 또한, x'_H 의 측정값은 거의 $-0.45L_{pp}$ 로써, 선체의 선미 부분에서 작용하고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 선체와 타 사이에서 작용하는 유체력의 간섭을 고려하면 이해할 수 있다. 다음의 Fig. 2.3과 같이 조타를 실시함에 따라 타에서 양력이 발생함과 동시에 선체와 타 사이의 유체력 간섭에 의해서 부가 횡력 성분 ΔY 가 선체에서 발생한다.

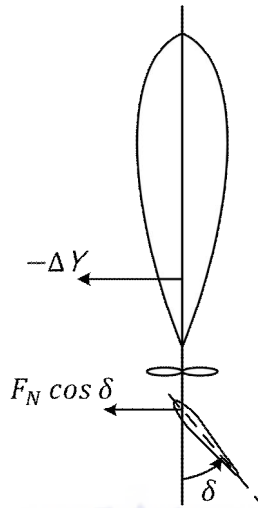


Fig. 2.3 Rudder force and additional force induced by steering

따라서 a_H 는 $-\Delta Y/F_N \cos \delta$ 로 정의되고, x'_H 는 ΔY 의 작용점으로 간주할 수 있다. 이러한 현상은 Karasuno(1969)로부터 발견되었으며, Hess(1978)에 의해 이론적으로 정의되었다(Yasukawa and Yoshimura, 2015).

조타 저항 감소 계수 t_R 은 Matsumoto 방법(Matsumoto and Suemitsu, 1980)에 의해서 식 (29)와 같이 가정되었다.

$$(1-t_R) = 0.28C_b + 0.55 \quad (29)$$

또한, 프로펠러 위치에서의 반류 계수 w_{P0} 는 D. W. Taylor(Kijima et al., 1990)에 의하여 식 (30)과 같이 가정되었다.

$$w_{P0} = 0.5C_b - 0.05 \quad (30)$$

간섭 계수 중에서도 특히 정도 높은 추정이 어려운 계수는 타 위치에서의 반류 계수 w_{R0} 와 정류 계수 γ 이며, 이 계수들은 전진거리와 전술 선회반경 등에 영향을 미치는 선박 조종운동 특성에서 매우 중요한 요소이다. 이 경험식에서 반류비 ε 과 정류 계수 γ 는 선체 형상 특성 계수 $C_b B/L$ 의 함수로써 식 (31)와

같이 가정하였다.

$$\varepsilon = (1 - w_{R0}) / (1 - w_{P0}) = -156.2(C_b B/L)^2 + 41.6(C_b B/L) - 1.76 \quad (31)$$

$$\gamma = -22.2(C_b B/L)^2 + 0.02(C_b B/L) + 0.68$$

2.3.2 선미 형상을 고려한 경험식

Formula 1990과 함께 대상 어선에 대한 유효성 유무를 검증하기 위하여 Kijima and Nakiri(1999)의 선미 형상을 고려한 경험식 Formula 1999를 이용하였다. Kijima et al.은 Formula 1990을 제안한 이후, 전체적으로는 동일 선형일 지라도 선미 형상의 미소한 차이에 의해서 선박 조종성능에 큰 변화가 발생한다는 연구결과가 발표됨에 따라 식 (32)에 제시한 Mori(1995)가 제안한 선미 형상을 표현하는 계수를 포함하여 Formula 1999를 새로이 제안하였다(Kijima and Nakiri, 1999).

$$e_a = \frac{L}{B}(1 - C_{pa}) \quad (32)$$

$$e'_a = \frac{e_a}{\sqrt{\frac{1}{4} + \frac{1}{(B/d)^2}}}$$

$$\sigma_a = \frac{1 - C_{wa}}{1 - C_{pa}}$$

$$K = \left(\frac{1}{e'_a} + \frac{1.5}{L/B} - 0.33 \right) (0.95\sigma_a + 0.40)$$

여기서, e_a 는 선미 run부위의 비대도, σ_a 는 선미 프레임 라인의 형상 계수, K 는 형상 계수, C_{wa} 와 C_{pa} 는 각각 선미 부분의 수선 면적 계수와 주형 계수를 나타낸다. 2.3.1절과 마찬가지로 등홀수(even keel) 상태에서 선체에 작용하는 힘인 횡력(lateral force)과 선수동요(yaw moment)에 대한 미계수(derivatives)를

도출하는 방법은 식 (33)과 같다.

$$Y_{\beta}' = \frac{1}{2}\pi k + 1.9257(C_b B/L)\sigma_a \quad (33)$$

$$Y_r' - (m' + m_x') = \frac{1}{4}\pi k + 0.052e_a' - 0.457$$

$$Y_{\beta\beta}' = -1.199C_b\sigma_a + 1.05$$

$$Y_{rr}' = 0.225(dC_b/B)e_a' - 0.12$$

$$Y_{\beta rr}' = 7.1256\{d(1 - C_b)/B\}$$

$$Y_{\beta\beta r}' = 10.443[d(1 - C_b)/B.e_a'K]^2 - 9.374\{d(1 - C_b)/B\}e_a' + 1.227$$

$$N_{\beta}' = k\{150.668[d(1 - C_b)/B.e_a'K]^2 - 23.819[d(1 - C_b)/B.e_a'K] + 1.802\}$$

$$N_r' = -0.54k + k^2 - 0.0477e_a'K + 0.0368$$

$$N_{\beta\beta}' = 43.857[d(1 - C_b)/B.e_a'K]^2 - 3.671[d(1 - C_b)/B.e_a'K] + 0.086$$

$$N_{rr}' = 0.15K - 0.068$$

$$N_{\beta rr}' = -0.4086C_b + 0.27$$

$$N_{\beta\beta r}' = -0.826\{d(1 - C_b/B)\}e_a' - 0.026$$

이후, 2003년 방형 비척 계수 C_b 와 형상 계수 K 에 따라 식 (34)와 같이 선체에 작용하는 비선형 미계수 값이 더욱 세분화된 Formula 2003이 제안되었다 (Kijima and Nakiri, 2003).

(34)

$$Y'_\beta = \frac{1}{2}\pi k + 1.9257(C_b B/L)\sigma_a$$

$$Y'_r - (m' + m'_x) = \frac{1}{4}\pi k + 0.052e'_a - 0.457$$

$$\text{if } C_b < 0.6 \text{ then } Y'_{\beta\beta} = 52.9 \frac{d(1-C_b)}{B} K - 0.12473$$

$$\text{else } C_b > 0.6 \text{ and } C_b \leq 0.75 \text{ then } Y'_{\beta\beta} = -0.1700e'_a K (B/d) + 1.08$$

$$\text{else } C_b > 0.75 \text{ and } K \leq 0.35 \text{ then } Y'_{\beta\beta} = 4.17k C_b e'_a - 0.4475$$

$$\text{else } Y'_{\beta\beta} = -0.4784 \frac{B}{d} K + 1.3$$

$$\text{if } C_b \leq 0.6 \text{ and } \frac{C_b B}{L} K < 0.008 \text{ then } Y'_{\beta\beta r} = 306.52 \frac{C_b B}{L} K - 2.31454$$

$$\text{else } \frac{C_b B}{L} K > 0.008 \text{ then } Y'_{\beta\beta r} = -186.14 \frac{C_b B}{L} K + 0.902$$

$$\text{else } C_b > 0.6 \text{ then } Y'_{\beta\beta r} = 13.018 C_b - 9.2775$$

$$\text{else } C_b < 0.75 \text{ and } K \leq 0.3 \text{ then } Y'_{\beta\beta r} = -42.6537 \frac{C_b B}{L} + 5.9$$

$$\text{else } Y'_{\beta\beta r} = 0.78145 e'_a K - 0.43232$$

$$Y'_{rr} = 0.24267 \frac{d C_b}{B} e'_a - 0.13108$$

$$Y'_{\beta rr} = -1.38643 C_b e'_a K + 1.29$$

$$N'_\beta = k \left\{ 150.668 \left[d(1-C_b)/B \cdot e'_a K \right]^2 - 23.819 \left[d(1-C_b)/B \cdot e'_a K \right] + 1.802 \right\}$$

$$\text{if } (d(1-C_b)/B)\sigma_a K \geq 0.0133 \text{ and } (d(1-C_b)/B)\sigma_a K \leq 0.0144 \text{ then}$$

$$N'_\beta = k \left\{ 150.668 \left[d(1-C_b)/B \cdot e'_a K \right]^2 - 23.819 \left[d(1-C_b)/B \cdot e'_a K \right] + 1.976 \right\}$$

$$N_r' = -0.54k + k^2 - 0.0477e_a'K + 0.0368$$

$$N_{\beta\beta}' = 43.857 \left[d(1 - C_b)/B \cdot e_a'K \right]^2 - 3.671 \left[d(1 - C_b)/B \cdot e_a'K \right] + 0.086$$

$$N_{rr}' = 0.15K - 0.068$$

$$N_{\beta rr}' = -0.4086C_b + 0.27$$

$$N_{\beta\beta r}' = -0.826 \{ d(1 - C_b)/B \} e_a' - 0.026$$



제 3 장 경험식의 유효성 검증

이 장에서는 상선 선형을 대상으로 개발된 Kijima et al. 경험식을 어선 선형에 적용함에 있어서 유효성 유무를 검증하기 위하여 다음과 같은 연구를 수행하였다.

먼저, 이 연구의 대상인 선미식 트롤 어선 중에서 실선 선회권 시험 자료가 확보된 어선 4척을 선정하고 Formula 1990, 1999, 2003을 이용하여 조종 유체력 미계수 값을 도출하였다. 이후 도출된 조종 유체력 미계수 값을 이용하여 $+35^{\circ}$ 타각과 -35° 타각에서의 선회운동 시뮬레이션을 수행하였고, 각 대상 어선의 실선 시험 결과와 비교·분석하여 상선 선형을 대상으로 개발된 경험식을 어선 선형에 적용함에 있어서 유효성 유무를 검증하였다.

3.1 대상 선박 선정

Kijima et al. 경험식의 유효성 유무를 검증하기 위하여 Table 3.1과 같이 대상 어선 4척(이하 F1 ~ F4라 한다.)을 선정하였다. 대상 어선은 수산계 대학의 실습선으로서 총톤수 1,000 ~ 2,000톤 급으로 우리나라의 전형적인 공모선형 선미식 트롤 어선이다. 이 선박들은 실선 시험의 결과를 보유하고 있다.

Table 3.1 Dimension of ships

	F1	F2	F3	*F4
Type of ship	Stern trawler			
Scale	1/20.833	1/20.2	1/24.167	1/28.333
$L_{pp}(m)$	3.0	3.0	3.0	3.0
$B(m)$	0.576	0.6089	0.5462	0.5294
$d_m(m)$	0.2112	0.2228	0.2069	0.1835
C_b	0.607	0.616	0.574	0.5872
$A_R/L_{pp}d$	0.025	0.029	0.026	0.016

* Flap rudder fitted vessel

대상 어선으로 선정한 공모선형 선미식 트롤 어선은 어업에 종사하는 선종 중에서 선체가 큰 편에 속하여, 외력의 영향을 타 선종보다 비교적 적게 받기 때문에 신뢰성이 높은 자료를 확보할 수 있다. 그리고 실선 시험의 결과를 보유하고 있어서 경험식으로 도출한 선회운동 시뮬레이션 결과와 정량적으로 비교할 수 있는 장점이 있다.

3.2 조종 유체력 미계수 도출

3.1절의 Table 3.1에 제시한 대상 어선 4척의 제원을 Formula1990, 1999, 2003에 각각 대입하여 조종 유체력 미계수 값을 도출하였고, 선체에 작용하는 미계수 값을 Table 3.2에 나타내며, Fig. 3.1(a) ~ (c)와 같이 도시하였다.

Fig. 3.1(a) ~ (c)에서 대상 어선의 조종 유체력 미계수 값 중에서 선형 미계수 값의 경우는 Formula 1990으로부터 도출한 값과 Formula 1999와 2003 각각으로부터의 값이 눈에 띄는 경향의 차이를 나타내지 않았으나, 비선형 미계수 값의 경우는 세 경험식의 결과 값이 다소 상이한 경향을 나타내기도 하였다.

Table 3.2 Hydrodynamic derivatives of target fishing vessels

	No considering the effect of				Considering the effect of							
	stern shape				stern shape							
	formula 1990				formula 1999				formula 2003			
	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4
Y'_β	0.3842	0.4082	0.3629	0.3371	0.2693	0.2849	0.2741	0.2562	0.2693	0.2849	0.2741	0.2562
$Y'_{\beta\beta}$	0.8603	0.8513	0.9034	0.8577	0.8937	0.8913	0.8534	0.8237	0.8266	0.8147	1.8869	1.5742
$Y'_r - (\dot{m}' + \dot{m}'_x)$	-0.1748	-0.1875	-0.1568	-0.1554	-0.2285	-0.2288	-0.2212	-0.2253	-0.2285	-0.2288	-0.2212	-0.2253
Y'_{rr}	0.0063	0.0073	0.0046	-0.0002	-0.0064	-0.0111	-0.0001	-0.0006	-0.0086	-0.0137	-0.0017	-0.0023
$Y'_{\beta rr}$	0.8574	0.8360	0.9601	0.8514	1.0268	1.0012	1.1498	1.0197	0.8301	0.8024	0.8302	0.8135
$Y'_{\beta\beta r}$	-0.3162	-0.3119	-0.3239	-0.3447	-0.7212	-0.6505	-0.8471	-0.8169	-1.3756	-1.2584	-3.6824	-3.4267
N'_β	0.1408	0.1485	0.1379	0.1223	0.1212	0.1279	0.1229	0.1057	0.1212	0.1279	0.1229	0.1057
$N'_{\beta\beta}$	-0.0723	-0.0689	-0.0889	-0.0714	0.0689	0.0737	0.1250	0.0862	0.0689	0.0737	0.1250	0.0862
N'_r	-0.0562	-0.0581	-0.0555	-0.0511	-0.0455	-0.0486	-0.0462	-0.0422	-0.0455	-0.0486	-0.0462	-0.0422
N'_{rr}	-0.0317	-0.0275	-0.0377	-0.0382	-0.0319	-0.0281	-0.0327	-0.0343	-0.0319	-0.0281	-0.0327	-0.0343
$N'_{\beta rr}$	-0.0613	-0.0627	-0.0587	-0.0518	0.0220	0.0183	0.0355	0.0301	0.0220	0.0183	0.0355	0.0301
$N'_{\beta\beta r}$	-0.2366	-0.1983	-0.3051	-0.3108	-0.2960	-0.2752	-0.3528	-0.3343	-0.2960	-0.2752	-0.3528	-0.3343

아래의 Fig. 3.1(a)은 Formula 1990, 1999, 2003 각각으로부터 도출한 대상 어선의 선형 미계수 값을 나타낸 그래프이다. 여기서, 각각의 그래프에 나타낸 세로축은 선형 미계수 값을 나타내고, 가로축은 대상 어선 F1 ~ F4를 나타낸다.

Y'_β, N'_β, N'_r 는 Formula 1990으로부터 도출한 값이 Formula 1999와 2003으로부터 도출한 값보다 크게 나타났으며, $Y'_r - (m' + m'_x)$ 의 값은 작게 나타났다. 그러나 $Y'_r - (m' + m'_x)$ 는 비교적 작은 값을 갖는 Y'_r 에 비해 큰 값을 가지는 질량과 부과질량의 합 $(m' + m'_x)$ 이 포함되었기 때문에 이것을 제외한다면 Y'_r 의 값 역시 Formula 1990으로부터 도출한 값이 Formula 1999와 2003으로부터의 값보다 크게 나타난 것으로 볼 수 있다. 따라서 대상 어선의 선형 미계수 값은 모두 선미 형상을 고려하지 않은 경험식 Formula 1990으로부터 도출한 값이 선미 형상을 고려한 두 경험식 Formula 1999와 2003으로부터 도출한 값보다 크게 나타났음을 확인할 수 있으며, 눈에 띄는 큰 차이는 보이지 않았다.



1) 좌표의 원점이 배의 중앙 근처에 있는 경우에는 Y_r 는 비교적 작은 값을 가진다(Yim, 1989).

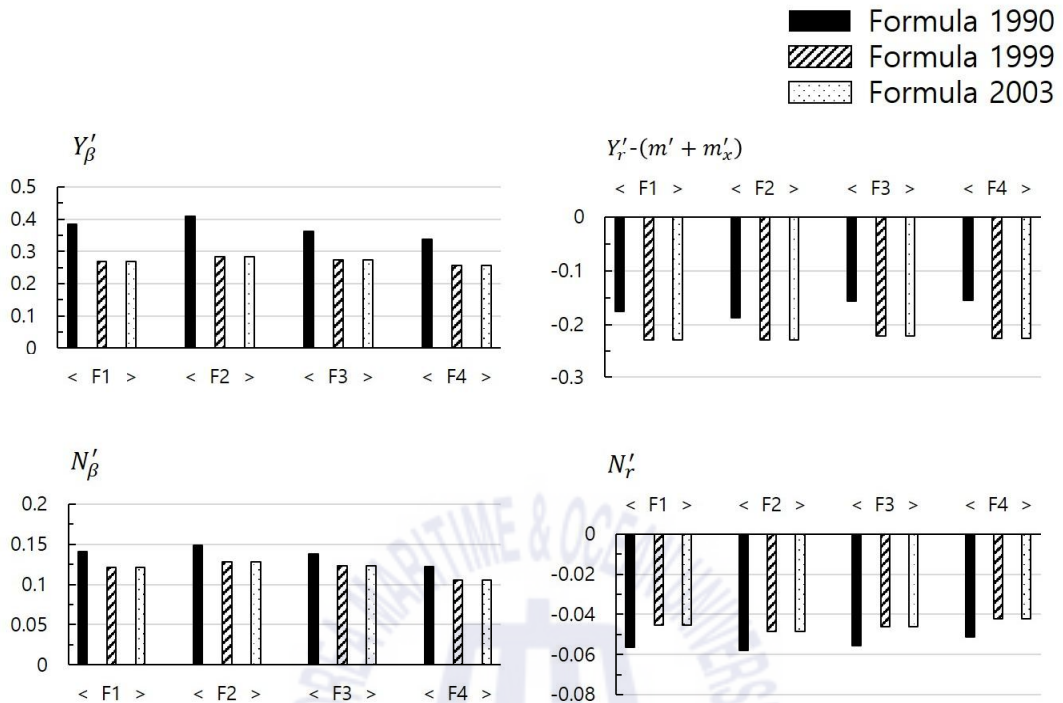


Fig. 3.1(a) Comparison of values of linear derivatives

아래의 Fig. 3.1(b)는 Formula 1990, 1999, 2003 각각으로부터 도출한 대상 어선의 횡력 성분의 미계수 값을 나타낸 그래프이다. 마찬가지로 각각의 그래프에 나타낸 세로축은 횡력 성분의 미계수 값을 나타내고, 가로축은 대상 어선 F1 ~ F4를 나타낸다.

Y'_{rr} 값은 F4를 제외한 F1 ~ F3은 Formula 1990으로부터 도출한 값이 양의 값을 나타냈으나, Formula 1999와 2003으로부터 도출한 값은 음의 값을 나타내는 등 선미 형상을 고려하지 않은 경험식과 고려한 경험식으로부터 도출한 값이 차이를 나타냄을 확인할 수 있다. 또한, 특이한 값으로써 $Y'_{\beta\beta}$ 와 $Y'_{\beta\beta r}$ 은 F1과 F2는 Formula 1990, 1999, 2003 각각으로부터 도출한 값 모두 유사한 경향을 가졌다. 그러나 F3과 F4는 선미 형상을 고려하지 않은 Formula 1990으로부터의 값과 선미 형상을 고려한 Formula 1999로부터의 값이 유사한 경향을 나타내는

반면, 또 다른 선미 형상을 고려한 Formula 2003으로부터의 값은 전혀 다른 경향을 나타내었다. 이는 식 (34)에서 확인할 수 있듯이 방형 비척 계수 C_b 나 형상 계수 K 값의 범위에 따라 미계수 도출 항을 세분화 시키는 과정에서 발생한 것으로써, 이러한 결과는 선체 형상의 미소한 차이에도 선체에 작용하는 조종 유체력 미계수 값은 확연히 달라질 수 있다는 것을 보여준다. $Y'_{\beta rr}$ 의 값은 Formula 1990, 1999, 2003 각각으로부터 도출한 값 모두 유사한 경향을 나타내었다.

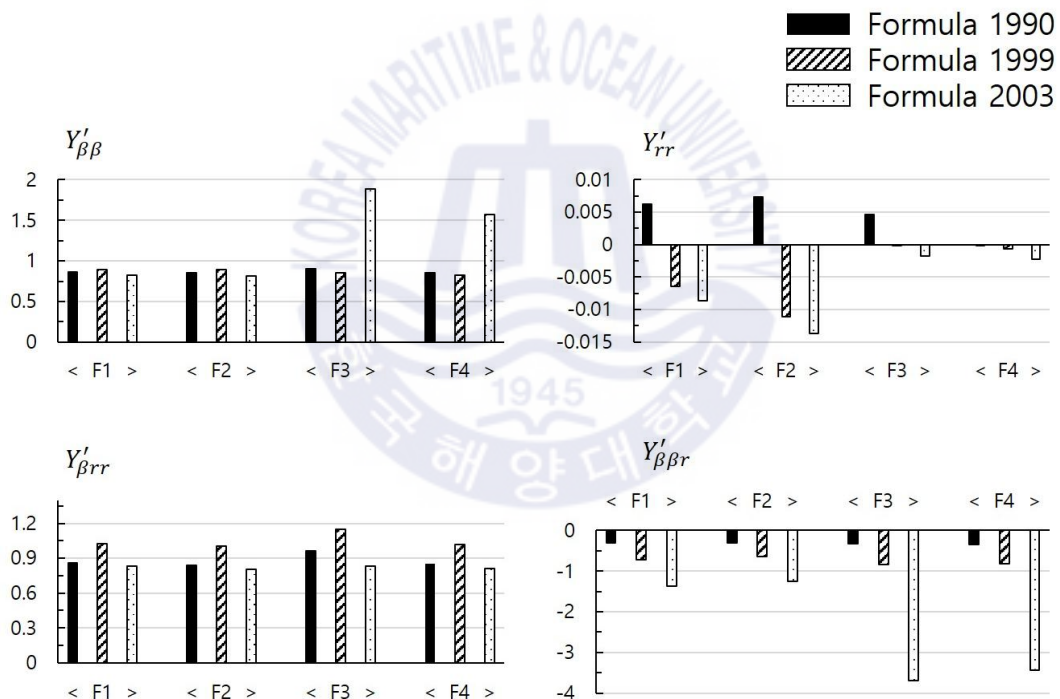


Fig. 3.1(b) Comparison of values of non-linear(lateral force) derivatives

아래의 Fig. 3.1(c)는 Formula 1990, 1999, 2003 각각으로부터 도출한 대상 어선의 모멘트 성분 미계수 값을 나타낸 그래프이다. 마찬가지로 각각의 그래프에서 나타낸 세로축은 모멘트 성분의 미계수 값을 나타내고, 가로축은 대상 어

선 F1 ~ F4를 나타낸다.

$N'_{\beta\beta}$ 와 $N'_{\beta rr}$ 의 값은 선미 형상을 고려하지 않은 경험식 Formula 1990과 선미 형상을 고려한 두 경험식 Formula 1999와 2003으로부터 도출한 값은 서로 반대 부호의 값을 가지며, N'_{rr} 와 $N'_{\beta\beta r}$ 의 값은 세 경험식 모두 유사한 값을 나타내었다.

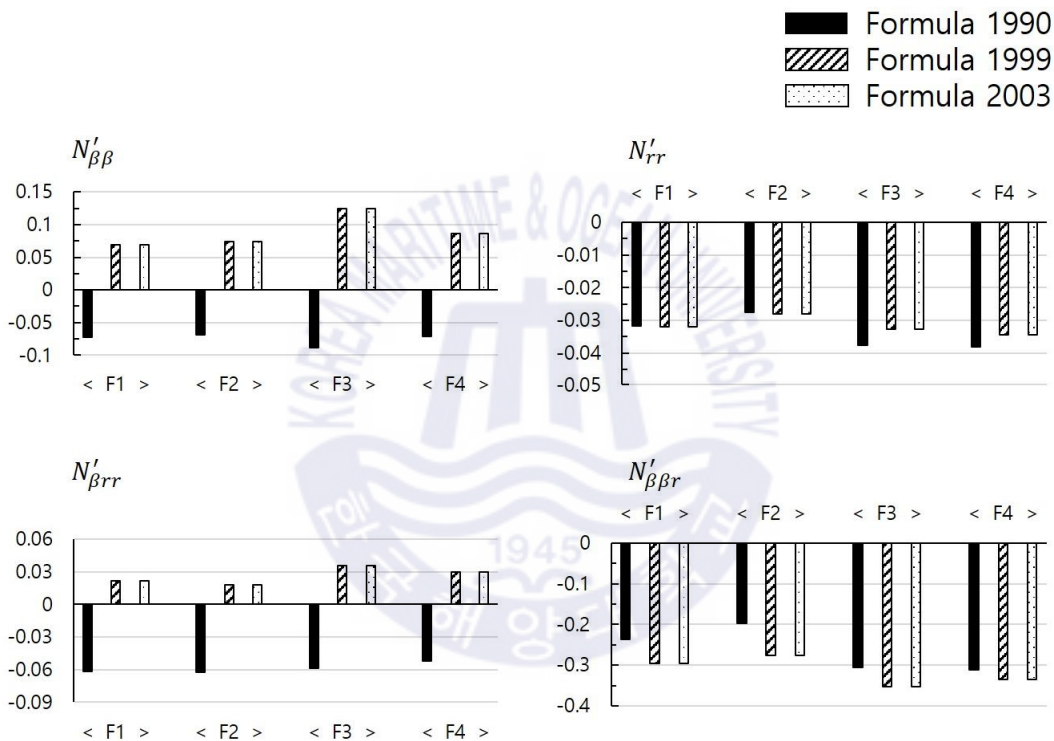


Fig. 3.1(c) Comparison of values of non-linear(moment) derivatives

이와 같이 선미 형상을 고려하지 않은 경험식과 선미 형상을 고려한 경험식 으로부터 도출한 미계수 값은 서로 유사한 경향을 나타내기도 하였고, 전혀 다른 경향을 나타내기도 하였다. 또한, 선미 형상을 고려한 경험식 사이에서도 방 형 비척 계수 C_b 나 형상 계수 K 값의 범위에 따라서 선체에 작용하는 미계수 값의 차이가 확연히 날 수 있음을 확인할 수 있다.

아래의 Fig. 3.2는 Kijima and Nakiri(1999)가 제시한 선체에 작용하는 조종 유체력 미계수 값과 비선형 항을 가장 잘 표현할 수 있는 특성 계수의 상관관계 분포를 나타낸 것이다. 각각의 그래프에서 세로축은 비선형 항을 나타낸 것이며, 가로축에 나타난 선미 형상이 포함된 계수는 세로축의 비선형 항을 가장 잘 표현할 수 있는 계수를 골라서 나타낸 것이다. 그림에서 Formula 1999로부터 도출한 대상 어선 4척의 미계수 값 역시 $N'_{\beta\beta}$ 와 $N'_r - (K^2 - 0.54K)$ 의 미소한 차이를 제외하고는 대부분이 상선이 나타내는 일반적인 분포와 유사함을 알 수 있다.

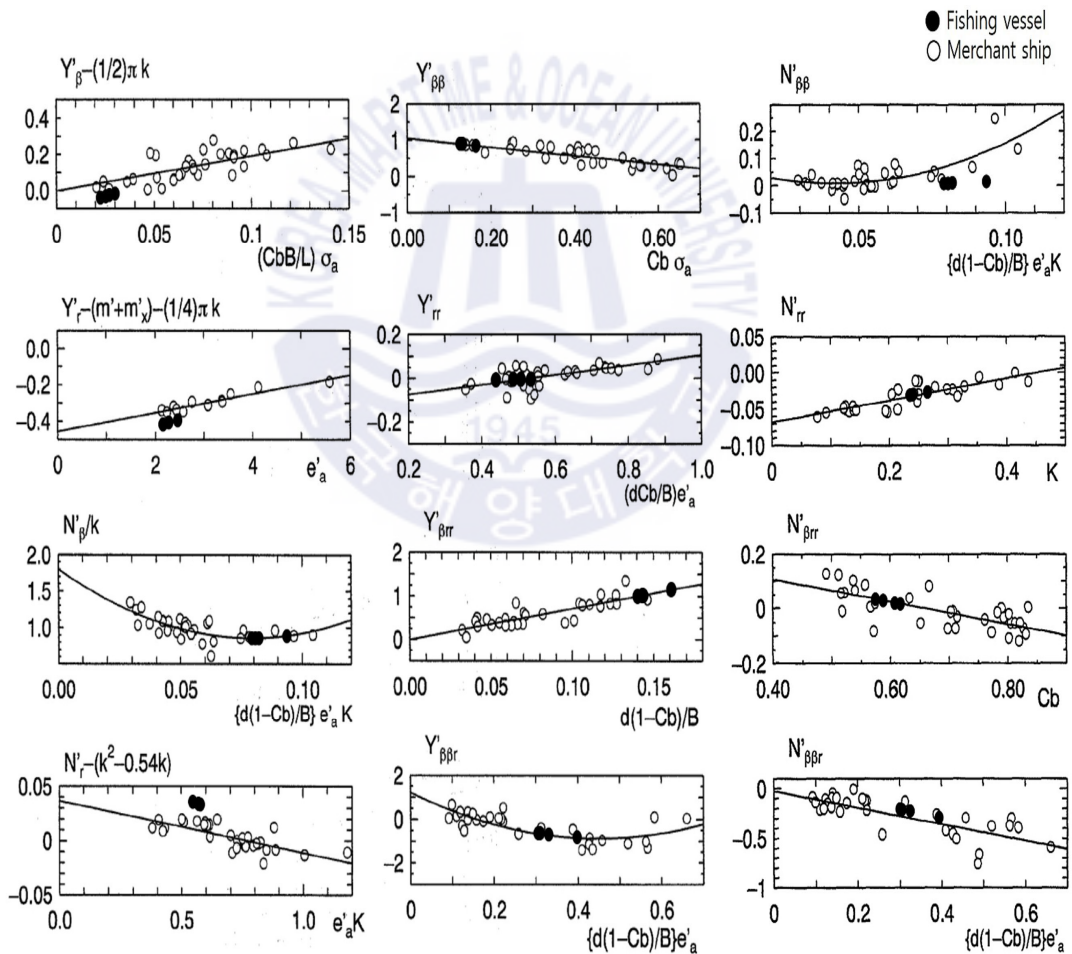


Fig. 3.2 Correlation between derivatives and hull shape parameters

3.3 선회운동 시뮬레이션 수행

이 절에서는 3.2절에서 도출한 대상 어선의 조종 유체력 미계수 값을 이용하여 선회운동 시뮬레이션을 수행하였고, 각 선박의 실선 시험 결과와 정량적으로 비교하여 근사 정도를 분석하였다.

3.3.1 수행 조건

대상 어선 4척의 선회운동 시뮬레이션은 초기 선속 U_0 를 제외하고는 각 선박의 설계 단계에서 이루어졌던 조건과 동일하게 적용하였으며, 수행 조건은 다음과 같다.

대상 어선의 흘수는 설계상 만재흘수이면서 등흘수(even keel)로 설정하였고, 수심은 심수 역(deep water), 외란(disturbance)은 없는 것으로 가정하여 IMO 조종성 평가 조건과 동일하게 설정하였다. 단, 초기 선속 U_0 는 각 선박의 실선 시험 결과와의 비교를 고려하여, 시험 당시와 동일하게 설정하였다. 한편, 트림이나 외력의 영향 등은 실선 시험 조건과 미소한 차이를 가지나, IMO 조종성 평가 조건과 본 연구의 목적인 설계 단계에서의 조종성능 추정 및 검증에는 충분히 부합되는 것으로 판단하였다. 또한, 시뮬레이션 수행을 위한 시간(sec.) 단위의 미계수 값 계산은 포트란90(MS Fortran Power Station 4.0) 프로그램을 사용하였다.

3.3.2 수행 결과

Formula 1990, 1999, 2003 각각으로부터 도출한 조종 유체력 미계수 값을 이용하여 대상 어선 4척에 대한 선회운동 시뮬레이션을 수행하였고, 그 결과 값을 아래의 Table 3.3(a) ~ (d)에 나타내고, Fig. 3.3(a) ~ (d)와 같이 도시하였다.

대상 어선 F1에 대하여 타각 $+35^\circ$, -35° 로 선회하였을 경우의 실선 시험 결과와 Formula 1990, 1999, 2003 각각으로부터 수행한 시뮬레이션의 결과는

Table 3.3(a), Fig. 3.3(a)와 같다.

+35° turn에서 Advance의 경우, 실선 시험에서의 결과인 2.56L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 3.84L을 나타내면서 1.28L만큼 확대되었고, Formula 1999와 Formula 2003의 결과는 각각 0.56L을 나타내면서 2.0L만큼 축소되었다. 또한, Transfer의 경우, 실선 시험에서의 결과인 1.76L에 비교하여 보면 Formula 1990으로 도출한 결과는 2.67L을 나타내면서 0.91L만큼 확대되었고, Formula 1999와 Formula 2003의 결과는 각각 0.38L과 0.37L을 나타내면서 1.38L과 1.39L만큼 축소되었다. 마지막으로 Tac. Dia.의 경우, 실선 시험에서의 결과인 3.84L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 5.20L을 나타내면서 1.36L만큼 확대되었고, Formula 1999와 Formula 2003의 결과는 각각 0.82L을 나타내면서 3.02L만큼 축소되었다.

-35° turn에서 Advance의 경우, 실선 시험에서의 결과인 2.72L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 3.74L을 나타내면서 1.02L만큼 확대되었고, Formula 1999와 Formula 2003의 결과는 각각 0.56L을 나타내면서 2.16L만큼 축소되었다. 또한, Transfer의 경우, 실선 시험에서의 결과인 1.89L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 2.58L로 나타내면서 0.69L만큼 확대되었고, Formula 1999와 Formula 2003의 결과는 각각 0.40L과 0.42L을 나타내면서 1.49L과 1.47L만큼 축소되었다. 마지막으로 Tac. dia.의 경우, 실선 시험에서의 결과인 4.14L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 5.06L을 나타내면서 0.92L만큼 확대되었고, Formula 1999와 Formula 2003의 결과는 각각 0.82L을 나타내면서 3.32L만큼 축소되었다.

Table 3.3(a) Value of turning-trajectories of F1

F1		Measured	Simulated	Simulated	Simulated
		(sea trial test)	(formula 1990)	(formula 1999)	(formula 2003)
+35° turn	Advance (m)	160(2.56L)	240(3.84L)	35(0.56L)	35(0.56L)
	Transfer (m)	110(1.76L)	167(2.67L)	24(0.38L)	23(0.37L)
	Tac. Dia. (m)	240(3.84L)	325(5.20L)	51(0.82L)	51(0.82L)
-35° turn	Advance (m)	170(2.72L)	234(3.74L)	35(0.56L)	35(0.56L)
	Transfer (m)	118(1.89L)	161(2.58L)	25(0.40L)	26(0.42L)
	Tac. Dia. (m)	259(4.14L)	316(5.06L)	51(0.82L)	51(0.82L)

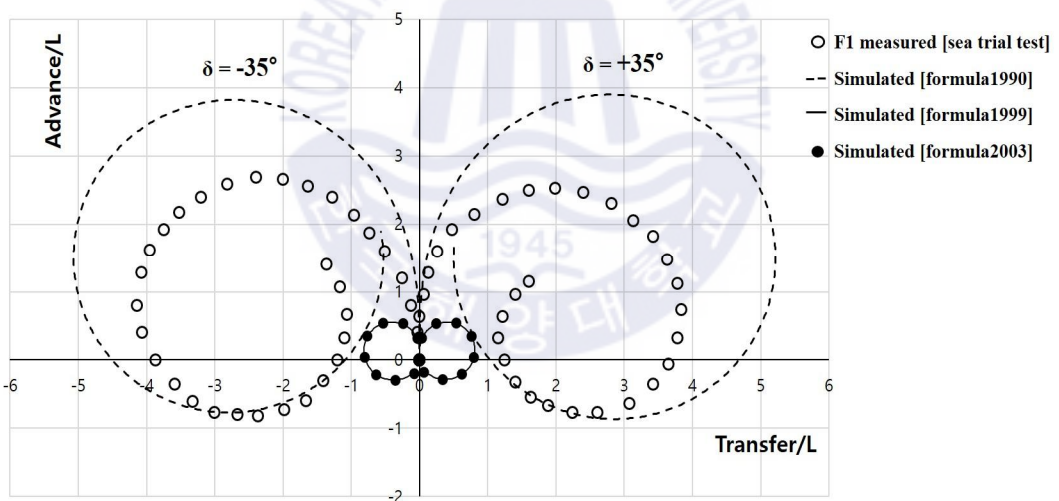


Fig. 3.3(a) Comparison of turning-trajectories of F1

대상 어선 F2에 대하여 타각 +35°, -35°로 선회하였을 경우의 실선 시험 결과와 Formula 1990, 1999, 2003 각각으로부터 수행한 시뮬레이션의 결과는 Table 3.3(b), Fig. 3.3(b)와 같다.

먼저, $+35^{\circ}$ turn에서 Advance의 경우, 실선 시험에서의 결과인 2.81L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 3.70L을 나타내면서 0.89L만큼 확대되었고, Formula 1999와 Formula 2003의 결과는 각각 0.48L과 0.46L을 나타내면서 2.33L과 2.35L만큼 축소되었다. 또한, Transfer의 경우, 실선 시험에서의 결과인 1.93L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 2.48L을 나타내면서 0.55L만큼 확대되었고, Formula 1999와 Formula 2003의 결과는 각각 0.31L과 0.26L을 나타내면서 1.62L과 1.67L만큼 축소되었다. 마지막으로 Tac. Dia.의 경우, 실선 시험에서의 결과인 3.56L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 4.64L을 나타내면서 1.08L만큼 확대되었고, Formula 1999와 Formula 2003의 결과는 각각 0.61L을 나타내면서 2.95L만큼 축소되었다.

-35° turn에서 Advance의 경우, 실선 시험에서의 결과인 2.84L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 3.61L을 나타내면서 0.77L만큼 확대되었고, Formula 1999와 2003의 결과는 각각 0.46L을 나타내면서 2.38L만큼 축소되었다. 또한, Transfer의 경우, 실선 시험에서의 결과인 2.03L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 2.46L을 나타내면서 0.43L만큼 확대되었고, Formula 1999와 Formula 2003의 결과는 각각 0.31L을 나타내면서 1.72L만큼 축소되었다. 마지막으로 Tac. dia.의 경우, 실선 시험에서의 결과인 3.71L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 4.55L을 나타내면서 0.84L만큼 확대되었고, Formula 1999와 Formula 2003의 결과는 각각 0.61L을 나타내면서 3.10L만큼 축소되었다.

Table 3.3(b) Value of turning-trajectories of F2

F2		Measured (sea trial test)	Simulated (formula 1990)	Simulated (formula 1999)	Simulated (formula 2003)
+35° turn	Advance (m)	170(2.81L)	224(3.70L)	29(0.48L)	28(0.46L)
	Transfer (m)	117(1.93L)	150(2.48L)	19(0.31L)	16(0.26L)
	Tac. Dia. (m)	216(3.56L)	281(4.64L)	37(0.61L)	37(0.61L)
-35° turn	Advance (m)	172(2.84L)	219(3.61L)	28(0.46L)	28(0.46L)
	Transfer (m)	123(2.03L)	149(2.46L)	19(0.31L)	19(0.31L)
	Tac. Dia. (m)	225(3.71L)	276(4.55L)	37(0.61L)	37(0.61L)



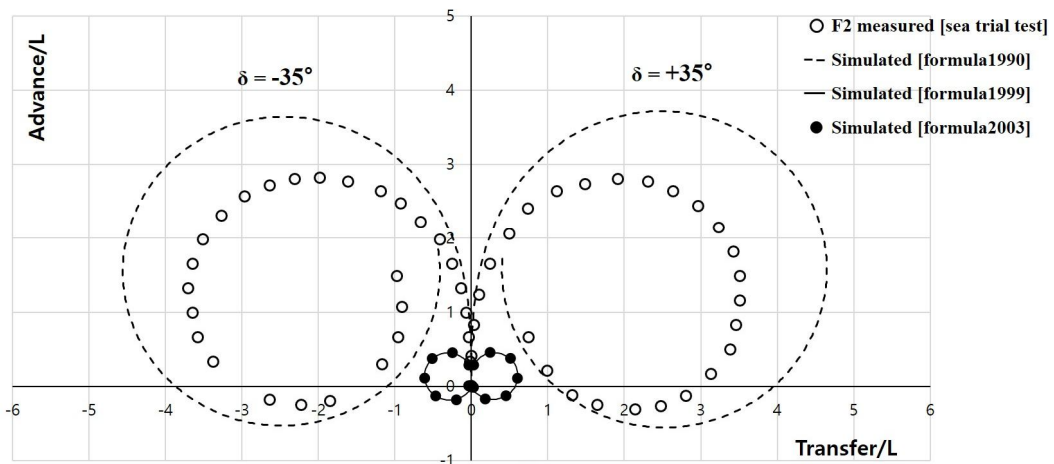


Fig. 3.3(b) Comparison of turning-trajectories of F2

대상 어선 F3에 대하여 타각 $+35^\circ$, -35° 로 선회하였을 경우의 실선 시험 결과와 Formula 1990, 1999, 2003 각각으로부터 수행한 시뮬레이션의 결과는 Table 3.3(c), Fig. 3.3(c)와 같다.

먼저, $+35^\circ$ turn에서 Advance의 경우, 실선 시험에서의 결과인 2.74L에 비교하여, Formula 1990으로 도출한 결과는 4.26L을 나타내면서 1.52L만큼 확대되었고, Formula 1999와 Formula 2003의 결과는 각각 0.36L을 나타내면서 2.38L만큼 축소되었다. 또한, Transfer의 경우, 실선 시험에서의 결과인 1.70L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 3.09L을 나타내면서 1.39L만큼 확대되었고, Formula 1999와 Formula 2003의 결과는 각각 0.26L과 0.23L을 나타내면서 1.44L과 1.47L만큼 축소되었다. 마지막으로 Tac. Dia.의 경우, 실선 시험에서의 결과인 4.25L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 6.03L을 나타내면서 1.78L만큼 확대되었고, Formula 1999와 Formula 2003의 결과는 각각 0.54L과 0.52L을 나타내면서 3.71L과 3.73L만큼 축소되었다.

-35° turn에서 Advance의 경우, 실선 시험에서의 결과인 2.79L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 4.15L을 나타내면서 1.36L만큼 확대되었

고, Formula 1999와 Formula 2003의 결과는 각각 0.36L을 나타내면서 2.43L만큼 축소되었다. 또한, Transfer의 경우, 실선 시험에서의 결과인 1.82L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 3.05L을 나타내면서 1.23L만큼 확대되었고, Formula 1999와 Formula 2003의 결과는 각각 0.25L과 0.26L을 나타내면서 1.57L과 1.56L만큼 축소되었다. 마지막으로 Tac. dia.의 경우, 실선 시험에서의 결과인 3.99L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 5.79L을 나타내면서 1.80L만큼 확대되었고, Formula 1999와 Formula 2003의 결과는 각각 0.52L을 나타내면서 3.47L만큼 축소되었다.

Table 3.3(c) Value of turning-trajectories of F3

F3		Measured (sea trial test)	Simulated (formula 1990)	Simulated (formula 1999)	Simulated (formula 2003)
+35° turn	Advance (m)	199(2.74L)	309(4.26L)	26(0.36L)	26(0.36L)
	Transfer (m)	123(1.70L)	224(3.09L)	19(0.26L)	17(0.23L)
	Tac. Dia. (m)	308(4.25L)	437(6.03L)	39(0.54L)	38(0.52L)
-35° turn	Advance (m)	202(2.79L)	301(4.15L)	26(0.36L)	26(0.36L)
	Transfer (m)	132(1.82L)	221(3.05L)	18(0.25L)	19(0.26L)
	Tac. Dia. (m)	289(3.99L)	420(5.79L)	38(0.52L)	38(0.52L)

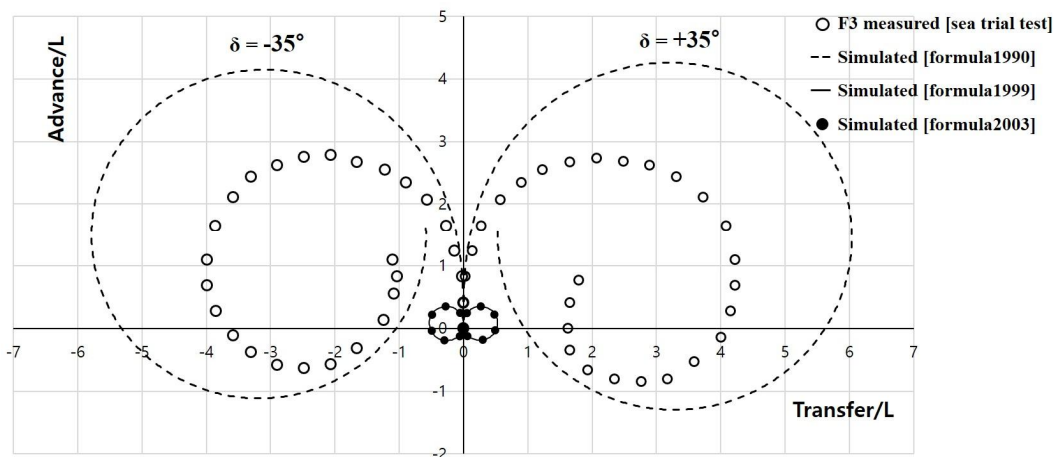


Fig. 3.3(c) Comparison of turning-trajectories of F3

대상 어선 F4에 대하여 타각 $+35^\circ$, -35° 로 선회하였을 경우의 실선 실험 결과와 Formula 1990, 1999, 2003 각각으로부터 수행한 시뮬레이션의 결과는 Table 3.3(d), Fig. 3.3(d)와 같다.

$+35^\circ$ turn에서 Advance의 경우, 실선 시험에서의 결과인 2.74L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 4.26L을 나타내면서 1.52L만큼 확대되었고, Formula 1999와 Formula 2003의 결과는 각각 0.36L을 나타내면서 2.38L만큼 축소되었다. 또한, Transfer의 경우, 실선 시험에서의 결과인 1.70L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 3.09L을 나타내면서 1.39L만큼 확대되었고, Formula 1999와 Formula 2003의 결과는 각각 0.26L과 0.23L을 나타내면서 1.44L과 1.47L만큼 축소되었다. 마지막으로 Tac. Dia.의 경우, 실선 시험에서의 결과인 4.25L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 6.03L을 나타내면서 1.78L만큼 확대되었고, Formula 1999와 Formula 2003의 결과는 각각 0.54L과 0.52L을 나타내면서 3.71L과 3.73L만큼 축소되었다.

-35° turn에서 Advance의 경우, 실선 시험에서의 결과인 2.79L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 4.15L을 나타내면서 1.36L만큼 확대되었고, Formula 1999와 Formula 2003의 결과는 각각 0.36L을 나타내면서 2.43L만

큼 축소되었다. 또한, Transfer의 경우, 실선 시험에서의 결과인 1.82L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 3.05L을 나타내면서 1.23L만큼 확대되었고, Formula 1999와 Formula 2003의 결과는 각각 0.25L과 0.26L을 나타내면서 1.57L과 1.56L만큼 축소되었다. 마지막으로 Tac. dia.의 경우, 실선 시험에서의 결과인 3.99L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 5.79L을 나타내면서 1.80L만큼 확대되었고, Formula 1999와 Formula 2003의 결과는 각각 0.52L을 나타내면서 3.47L만큼 축소되었다.

Table 3.3(d) Value of turning-trajectories of F4

F4		Measured (sea trial test)	Simulated (formula 1990)	Simulated (formula 1999)	Simulated (formula 2003)
+35° turn	Advance (m)	189(2.22L)	290(3.41L)	44(0.52L)	45(0.53L)
	Transfer (m)	120(1.41L)	201(2.36L)	32(0.38L)	32(0.38L)
	Tac. Dia. (m)	198(2.33L)	390(4.59L)	71(0.84L)	73(0.86L)
-35° turn	Advance (m)	202(2.38L)	281(3.31L)	44(0.52L)	45(0.53L)
	Transfer (m)	110(1.29L)	204(2.40L)	34(0.40L)	35(0.41L)
	Tac. Dia. (m)	189(2.22L)	396(4.66L)	71(0.84L)	73(0.86L)

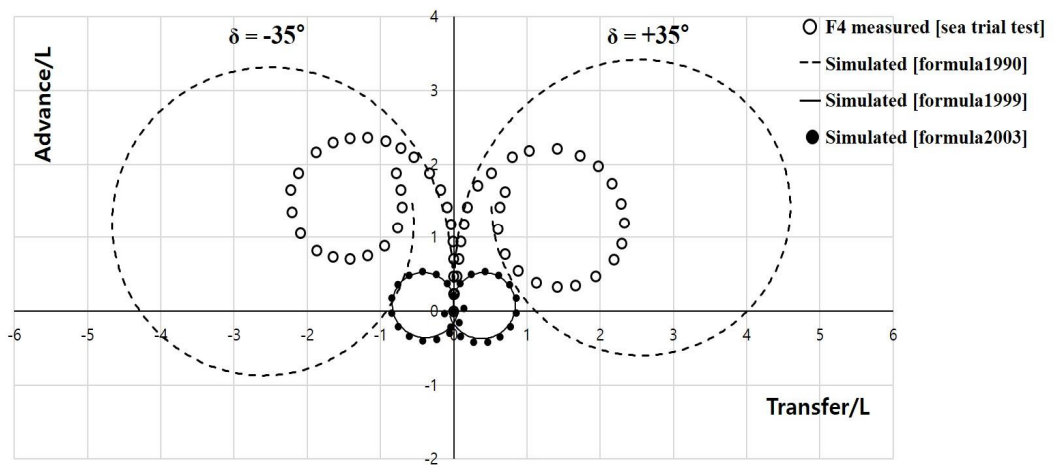


Fig. 3.3(d) Comparison of turning-trajectories of F4

이처럼 Table 3.3(a) ~ (d)와 Fig. 3.3(a) ~ (d)에서 확인한 바와 같이 선미 형상을 고려하지 않은 경험식 Formula 1990과 선미 형상을 고려한 경험식 Formula 1999와 2003으로부터 수행한 선회운동 시뮬레이션의 결과는 실선 시험의 결과와는 다소 차이를 나타냈다. 특히, 선미 형상을 고려한 경험식 Formula 1999와 2003으로부터의 결과는 더욱 큰 추정 오차를 발생시켰다.

3.3.3 수행 결과 분석

대상 어선 4척의 실선 시험 결과와 Formula 1990, 1999, 2003 각각으로부터 수행한 시뮬레이션 결과를 정량적으로 비교하기 위하여 아래의 Table 3.4와 같이 나타내었다. 여기서, 제시된 값은 대상 어선 4척의 평균을 나타낸 것이며, 실선 시험의 결과를 기준 값 '1'로 설정하였다.

Table 3.4 Quantitative comparison of turning-trajectories

Model fishing vessel	Measured (sea trial test)	Simulated (formula 1990)	Simulated (formula 1999)	Simulated (formula 2003)
Advance	1	1.43(+43%)	0.18(-82%)	0.18(-82%)
Transfer	1	1.55(+55%)	0.20(-80%)	0.20(-80%)
Tac. Dia.	1	1.50(+50%)	0.22(-78%)	0.22(-78%)
Average	1	1.49(+49%)	0.20(-80%)	0.20(-80%)

Formula 1990으로부터 수행된 선회운동 시뮬레이션의 결과를 실선 시험의 결과와 비교하여 보면, 전체 선회 궤적의 크기는 평균 1.49배(+49%) 확대되어 나타났으며, 특히 Transfer가 1.55배(+55%)로 가장 높았고, Advance가 1.43배(+43%)로 가장 낮았다. 반면, Formula 1999와 2003으로부터 수행한 선회운동 시뮬레이션 결과는 실선 시험 대비, 전체 선회 궤적 평균 0.20배(-80%)로 축소되어 나타났으며, 특히 Advance가 0.18배(-82%)로 가장 높았고, Tac. Dia.가 0.22배(-0.78%)로 가장 낮았다. 특이한 점은 선미 형상을 고려한 경험식 Formula 1999와 Formula 2003으로부터 도출한 미계수 값 $Y'_{\beta\beta}$, $Y'_{\beta r}$ 등은 서로 큰 차이를 보였음에도 불구하고, 선회 궤적의 크기는 거의 일치하였다.

이와 같은 결과를 통해서 선미 형상을 고려하지 않은 경험식 Formula 1990으로부터 수행한 선회운동 시뮬레이션의 결과가 선미 형상을 고려한 경험식 Formula 1999와 Formula 2003의 결과보다 상대적으로 실선 시험의 결과와 정량적으로 유사할 뿐만 아니라, 정성적으로도 유사하다고 판단할 수 있다.

그러나 Formula 1990의 결과 역시 실선 시험의 결과와는 다소 차이를 보이고 있음을 확인하였고, 트롤 어선 선형에 적용하기 위해서는 트롤 어선의 선형 특성 계수 등을 포함한 보정이 필요하였다.

제 4 장 보정 경험식 도출

경험식을 이용하여 선박의 조종성능을 추정하는 방법은 시간과 비용이 절약되는 이점이 있는 반면, 경험식 개발에 이용된 모형시험 결과가 제한된 선종의 선박들로만 구성되었기 때문에 각 선종의 조종 특성을 나타낼 수 있는 선형 특성 계수 또한 제한적일 수밖에 없는 단점이 있다. 따라서 이렇게 도출된 경험식을 모든 선종에 적용하기에는 각 선종이 가지는 고유한 선형 계수의 특성 등의 차이에 의해 추정 오차가 발생할 수 있다. 그러므로 경험식을 이용하여 추정 대상 선박의 조종성능을 추정함에 있어서 정도를 향상시키기 위해서는 대상 선종의 선형 특성을 나타내는 계수가 해당 경험식에 포함되어야 할 것이며, 그 종류와 양이 많을수록 추정의 정도가 높아질 것으로 판단된다.

따라서 이 장에서는 3장의 연구 결과에 따라 선미 형상이 고려되지 않은 경험식 Formula 1990을 대상 어선 선형의 선회성능 추정 정도를 높이기 위한 보정의 대상으로 선정하였고, 선종에 따른 선형 특성 계수의 차이 유무를 확인하여 트롤 어선 선형의 특성 계수가 포함된 보정 경험식을 도출하였다.

4.1 대상 선박 선정

Formula 1990으로부터 도출한 조종 유체력 미계수 값과 선종에 따른 고유한 선형 특성 계수의 상관관계를 확인하기 위하여 다음과 같은 조건의 대상 선박을 선정하였다. 먼저, Formula 1990 개발과정에 이용된 모형시험 결과의 대상이었던 상선 13척(이하 대상 상선이라 한다)을 선정하였으며, 그 이유는 Formula 1990을 도출하기 위한 모형시험 결과의 회귀분석 과정에서 이용된 대상이었기 때문에 Formula 1990으로부터 도출한 미계수 값과 선형 특성 계수와의 상관관계가 가장 잘 표현되는 표준 선박으로 판단되었기 때문이다. 또한, 대상 어선과의 제원 비교에 있어서도 대상이 아니었던 타 선종보다 명확한 비교가 가능할 것으로 판단되었다. 다음으로 3장에서 Kijima et al. 경험식의 유효성 검증 대상이었던 F1 ~ F4와 현재 건조 중인 선박 한 척을 포함하여 트롤 어선 5척(이하 대상 어선이라 한다)을 선정하였다. 단, 건조 중인 트롤 어선의 제원,

저항 및 자항 시험의 결과는 편차를 줄이기 위한 목적으로만 사용할 뿐, 유효성 검증은 하지 않기로 한다. 아래의 Table 4.1은 대상 선박들의 제원이다.

Table 4.1 Dimension of ships

	Type of ship	Scale	$L_{pp}(m)$	$B(m)$	$d_m(m)$	C_b
Fishing vessel	F1(Stern trawler)	1/20.833	3.0	0.576	0.2112	0.607
	F2(Stern trawler)	1/20.2	3.0	0.6089	0.2228	0.616
	F3(Stern trawler)	1/24.167	3.0	0.5462	0.2069	0.574
	F4(Stern trawler)	1/28.333	3.0	0.5294	0.1835	0.5872
	F5(Stern trawler)	1/28.333	3.0	0.5435	0.1871	0.5923
Merchant ship	A(VLCC)		2.5	0.436	0.157	0.802
	B(VLCC)		2.5	0.408	0.170	0.831
	C(ULCC)		2.5	0.466	0.156	0.835
	D(ULCC)		2.5	0.555	0.183	0.821
	E(ULCC)		2.5	0.500	0.183	0.820
	F(Cargo)		2.5	0.408	0.171	0.773
	G(Cargo)		2.5	0.419	0.140	0.698
	H(Cargo)		2.5	0.376	0.158	0.651
	I(Container)		3.0	0.435	0.1629	0.5717
	J(Container)		2.5	0.386	0.130	0.566
	K(RO/RO)		2.5	0.367	0.102	0.557
	L(Car carrier)		2.5	0.482	0.134	0.522
	M(LNG)		2.5	0.409	0.100	0.714

여기서, Formula 1990을 도출하기 위한 모형시험에 이용되었던 대상 상선은

Container ship 2척, Cargo ship 3척, LNG 1척, VLCC 2척, ULCC 3척, Car carrier 1척, RO/RO 1척을 포함하여 총 13척이며, 대상어선 5척은 모두 선미식 트롤 어선(수산계 대학 실습선)으로 구성하였다.

4.2 선형 특성 계수 확인

경험식을 구성하는 다항식은 모형시험의 결과를 회귀분석하는 과정에서 대상 선박들의 주요 제원을 이용하여 구성된다. 따라서 각각의 제원은 서로 상관관계를 가지며, 특히, 선체의 비대도나 제원의 비율 등 선형 특성을 표현하는 C_b , L/B , B/d 등의 계수들은 더욱 높은 관계를 가진다. 그로 인하여 모형시험에 포함되었던 선형과 유사한 특성을 가진 경우에는 조종성능을 추정함에 있어서 더욱 정도가 높으며, 포함되지 않았던 선형 특성을 가질 경우에는 다소 추정오차를 발생시킬 수 있다. 아래의 Fig. 4.1은 상기 Table 4.1에 제시한 선박들을 대상으로 경험식 회귀분석 과정에 있어서 가장 대표적인 선형 특성 계수 C_b 에 대한 L/B 를 상관시켜 도시한 것이다.

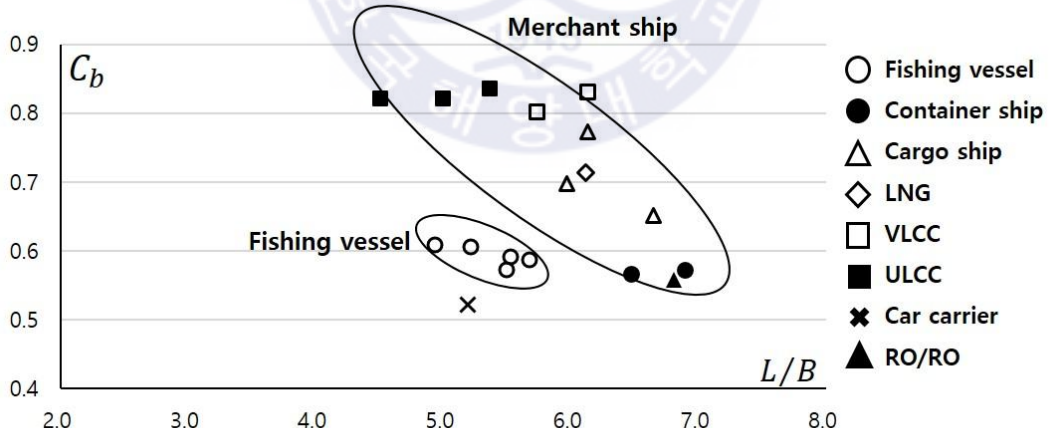


Fig. 4.1 Values of C_b according to L/B

일반적으로 대상 선박 모두 선형 계수 C_b 의 값이 커질수록 L/B 의 값이 작아지는 경향을 나타냈다. 즉, 선체의 비대도를 나타내는 계수 C_b 의 값이 커지면서 길이보다 폭이 커지는 것이다. 하지만 선종에 따라 미소한 차이는 존재하였고, 특히, Car carrier는 일반적인 상선이 나타내는 선형 특성 계수의 분포에서 완전히 벗어나 있음을 확인할 수 있다.

대상 어선의 경우 역시 일반적인 대상 상선의 선형 특성 계수가 나타내는 분포와는 다소 다른 범위를 나타내었다. 먼저, C_b 의 값은 0.6부근으로 Container ship이나 RO/RO와 비슷한 값의 범위를 나타내나, L/B 의 값은 5.0 ~ 6.0의 범위를 나타내면서 오히려 C_b 값이 0.8 이상인 ULCC나 VLCC와 비슷한 범위를 나타냈다. 이러한 어선 선형의 특성은 어군을 쫓기 위하여 민첩한 기동성을 지님과 동시에 충분한 어창 용적을 확보해야하는 전형적인 특성을 나타낸 것이다.

이와 같이 Formula 1990 도출 과정에서 모형시험의 대상이었던 상선 13척과 대상 어선 5척은 가장 대표적인 선형 특성 계수 C_b 에 대한 L/B 가 나타내는 범위부터 다소 차이를 보이고 있음을 확인하였다. 이에 Formula 1990을 이용하여 트롤 어선 선형에 적합한 보정 경험식을 도출하기에 앞서 다음의 Table 4.2와 Fig. 4.2(a) ~ (c)와 같이 대상 선박들의 선형 특성 계수 값이 나타내는 경향을 확인하였다.

Table 4.2 Comparison of hull shape parameters

	Type of ship	Parameters of the hull shape characteristic										
		C_b	k	L/B	B/d	d/C_b	$C_b B/L$	$d C_b/B$	$1 - C_b$	$1 - C_b(L/B)$	$B(1 - C_b)/L$	$d(1 - C_b)/B$
Fishing vessel	F1(Stern trawler)	0.607	0.1408	5.21	2.73	0.3479	0.1165	0.2226	0.3930	2.0469	0.0755	0.1441
	F2(Stern trawler)	0.616	0.1485	4.93	2.73	0.3617	0.1250	0.2254	0.3840	1.8919	0.0779	0.1405
	F3(Stern trawler)	0.574	0.1379	5.49	2.64	0.3605	0.1045	0.2174	0.4260	2.3398	0.0776	0.1614
	F4(Stern trawler)	0.5872	0.1223	5.67	2.89	0.3125	0.1036	0.2035	0.4128	2.3393	0.0728	0.1431
	F5(Stern trawler)	0.5923	0.1247	5.52	2.9	0.3159	0.1073	0.2039	0.4077	2.2504	0.0739	0.1404
Merchant ship	A(VLCC)	0.802	0.1256	5.73	2.78	0.1958	0.1399	0.2888	0.1980	1.1353	0.0345	0.0713
	B(VLCC)	0.831	0.1360	6.13	2.4	0.2046	0.1356	0.3463	0.1690	1.0355	0.0276	0.0704
	C(ULCC)	0.835	0.1248	5.36	2.99	0.1868	0.1556	0.2795	0.1650	0.8852	0.0308	0.0552
	D(ULCC)	0.821	0.1464	4.5	3.03	0.2229	0.1823	0.2707	0.1790	0.8063	0.0397	0.0590
	E(ULCC)	0.820	0.1464	5.0	2.73	0.2232	0.1640	0.3001	0.1800	0.9000	0.0360	0.0659
	F(Cargo)	0.773	0.1368	6.13	2.39	0.2212	0.1262	0.3240	0.2270	1.3909	0.0370	0.0951
	G(Cargo)	0.698	0.1120	5.97	2.99	0.2006	0.1170	0.2332	0.3020	1.8019	0.0506	0.1009
	H(Cargo)	0.651	0.1264	6.65	2.38	0.2427	0.0979	0.2736	0.3490	2.3205	0.0525	0.1467
	I(Container)	0.5717	0.1086	6.9	2.67	0.2849	0.0829	0.2141	0.4283	2.9538	0.0621	0.1604
	J(Container)	0.566	0.1040	6.48	2.97	0.2297	0.0874	0.1906	0.4340	2.8109	0.0670	0.1462
	K(RO/RO)	0.557	0.0816	6.81	3.6	0.1831	0.0818	0.1548	0.4430	3.0177	0.0650	0.1231
	L(Car carrier)	0.522	0.1072	5.19	3.6	0.2567	0.1006	0.1451	0.4780	2.4793	0.0922	0.1329
	M(LNG)	0.714	0.0800	6.11	4.09	0.1401	0.1168	0.1746	0.2860	1.7482	0.0468	0.0699

아래의 Fig. 4.2(a)에서 대상 어선의 방형 비척 계수 C_b 는 컨테이너와 가장 유사한 경향을 나타내었고, 선형의 비율을 나타내는 $k(=2d/L)$ 는 VLCC, ULCC와 유사하였다. 또한, 길이에 대한 폭의 비 L/B 는 VLCC, ULCC Car carrier와 유사하였고, 폭에 대한 깊이의 비 B/d 는 VLCC, ULCC, Cargo, Container 등 여러 선형과 유사한 경향을 나타내고 있음을 확인하였다.

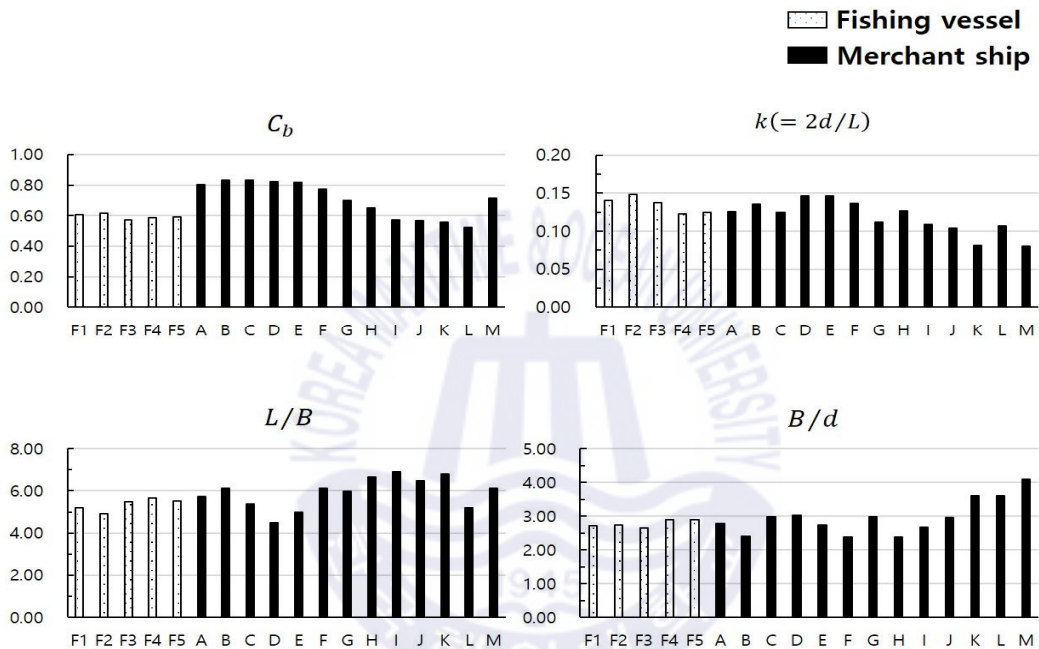


Fig. 4.2(a) Comparison of ratio of basic dimensions

아래의 4.2(b)에서 선형 특성을 나타내는 계수 중 대상 어선의 d/C_b 는 유사한 경향을 나타내는 대상 상선을 찾을 수 없었고, $C_b B/L$ 은 Cargo와 LNG와 유사하였다. 또한, dC_b/B 는 Cargo나 Container와 유사한 경향을 나타내고 있음을 확인하였다.

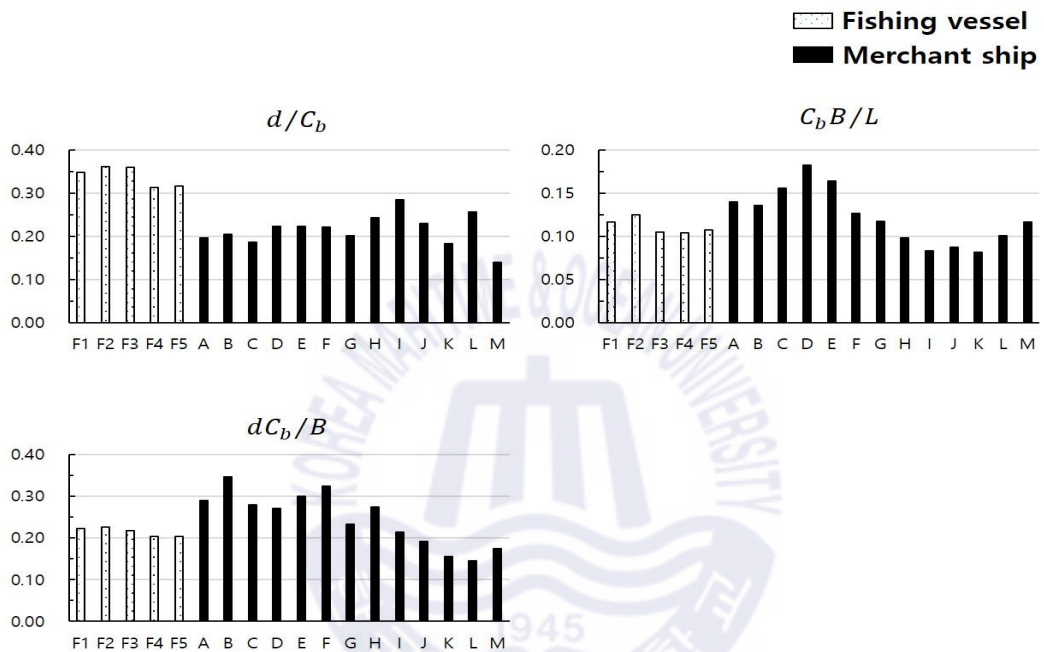


Fig. 4.2(b) Comparison of ratio of basic dimensions

아래의 Fig. 4.2(c)에서 선형 특성을 나타내는 중 대상 어선의 $1 - C_b$ 는 Container와 유사한 경향을 나타내었으며, $1 - C_b(L/B)$ 는 Cargo와 유사하였다. 또한, $B(1 - C_b)/L$ 은 유사한 경향을 나타내는 상선 선형은 없었으며, $d(1 - C_b)/B$ 는 Container와 유사한 경향을 나타내고 있음을 확인하였다.

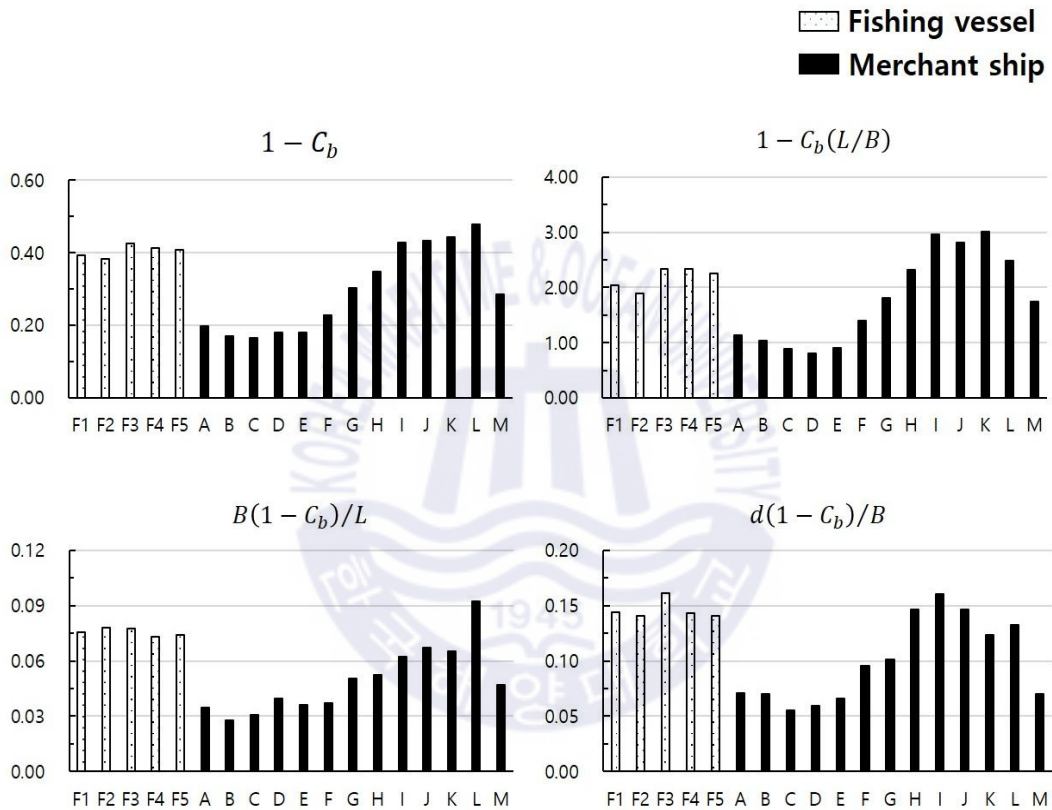


Fig. 4.2(c) Comparison of hull shape parameters

이와 같이 대상 선박들의 선형 특성 계수들은 각 선종마다 특색을 나타내고 있으며, 일반적으로 유사한 선형을 가진 선종은 유사한 경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 한편, 대상 어선의 경우는 대상 상선 선종과는 조금 다른 특색을 나타내었다. 즉, $k(=2d/L)$, L/B , B/d 와 같이 기본적인 선체 길이에 대한 비율을 나타내는 특성 계수는 VLCC, ULCC, Cargo와 유사한 경향을 나타

내고, C_b , $1 - C_b$ 등 비대도가 포함된 특성 계수는 일부 Container와 유사한 경향을 나타내기도 했다. 그러나 제원의 비율과 비대도가 복합적으로 상관관계를 맺고 있는 특성 계수는 어느 특정한 선종과 유사하지 않고 독립적인 특성을 나타내는 경향을 보였다.

4.3 조종 유체력 미계수 분석

4.2절을 통해서 대상 어선과 대상 상선은 선형에 따른 선형 특성 계수 값의 경향은 다소 차이를 나타내고 있음을 확인하였고, 이를 통하여 Formula 1990을 트롤 어선 선형에 적용하였을 경우 발생할 수 있는 추정 오차의 가능성을 추측할 수 있었다. 따라서 이 절에서는 Table 4.3(a) ~ (d)와 같이 Formula 1990로부터 대상 선박 18척의 조종 유체력 미계수 값을 도출하였고, Fig. 4.3(a) ~ (d)와 같이 도시하여 선형에 따른 미계수 값의 특성이 나타내는 경향을 분석하였다.



Table 4.3(a) Comparison of linear derivatives

Type of ship		Linear hydrodynamic derivatives			
		Y'_β	$Y'_r - (m' + m'_x)$	N'_β	N'_r
Fishing vessel	F1(Stern trawler)	0.3842	-0.1748	0.1408	-0.0562
	F2(Stern trawler)	0.4082	-0.1875	0.1485	-0.0581
	F3(Stern trawler)	0.3629	-0.1568	0.1379	-0.0555
	F4(Stern trawler)	0.3371	-0.1554	0.1223	-0.0511
	F5(Stern trawler)	0.3461	-0.1610	0.1247	-0.0518
Merchant ship	A(VLCC)	0.3930	-0.2098	0.1256	-0.0520
	B(VLCC)	0.4034	-0.2034	0.1360	-0.0549
	C(ULCC)	0.4138	-0.2335	0.1248	-0.0518
	D(ULCC)	0.4850	-0.2734	0.1464	-0.0576
	E(ULCC)	0.4594	-0.2460	0.1464	-0.0576
	F(Cargo)	0.3914	-0.1892	0.1368	-0.0552
	G(Cargo)	0.3396	-0.1755	0.1120	-0.0479
	H(Cargo)	0.3355	-0.1469	0.1264	-0.0523
	I(Container)	0.2866	-0.1243	0.1086	-0.0469
	J(Container)	0.2856	-0.1311	0.1040	-0.0453
	K(RO/RO)	0.2426	-0.1227	0.0816	-0.0374
	L(Car carrier)	0.3092	-0.1510	0.1072	-0.0464
	M(LNG)	0.2891	-0.1752	0.0800	-0.0368

아래의 Fig. 4.3(a)에서 대상 어선의 선형 미계수 값은 $Y'_r - (m' + m'_x)$ 가 Cargo, LNG와 비슷한 경향을 나타내는 것을 제외하고는, Y'_β, N'_β, N'_r 는 전반적으로 VLCC, ULCC, Cargo와 유사한 경향을 나타냈다. 여기서, $Y'_r - (m' + m'_x)$ 는 3.2절에 서술한 바와 같이 비교적 작은 값을 가지는 Y'_r 에 상대적으로 큰 값을 가지는 질량 $(m' + m'_x)$ 이 포함되어 있기 때문에 큰 질량

을 가지는 저속 비대선 ULCC, VLCC와 유사한 경향을 나타내지 않은 것으로 판단된다.

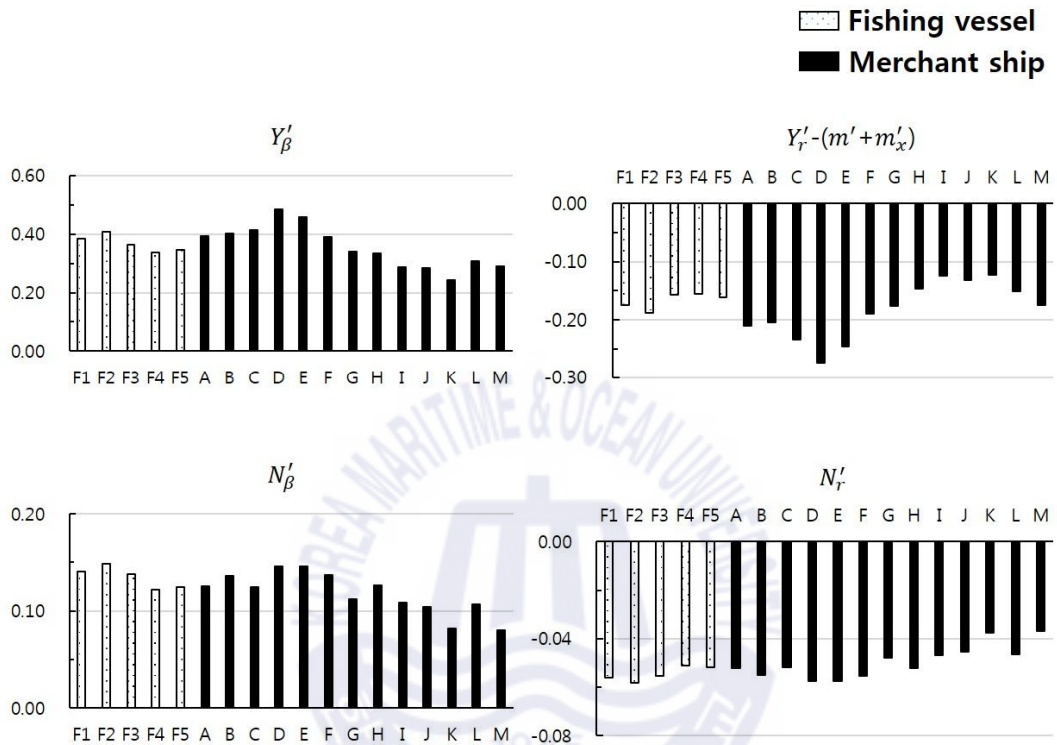


Fig. 4.3(a) Comparison of linear derivatives

Table 4.3(b) Comparison of non-linear(lateral force) derivatives

Type of ship		Nonlinear derivatives (Lateral force)			
		$Y'_{\beta\beta}$	Y'_{rr}	$Y'_{\beta rr}$	$Y'_{\beta\beta r}$
Fishing vessel	F1(Stern trawler)	0.8603	0.0063	0.8574	-0.3162
	F2(Stern trawler)	0.8513	0.0073	0.8360	-0.3119
	F3(Stern trawler)	0.9034	0.0046	0.9601	-0.3239
	F4(Stern trawler)	0.8577	-0.0002	0.8514	-0.3447
	F5(Stern trawler)	0.8509	-0.0001	0.8351	-0.3442
Merchant ship	A(VLCC)	0.6782	0.0291	0.4242	-0.2168
	B(VLCC)	0.6760	0.0488	0.4190	-0.1306
	C(ULCC)	0.6381	0.0259	0.3287	-0.2307
	D(ULCC)	0.6476	0.0229	0.3512	-0.2439
	E(ULCC)	0.6647	0.0329	0.3920	-0.1998
	F(Cargo)	0.7378	0.0411	0.5661	-0.1640
	G(Cargo)	0.7523	0.0100	0.6004	-0.3002
	H(Cargo)	0.8666	0.0238	0.8726	-0.2397
	I(Container)	0.9010	0.0034	0.9543	-0.3289
	J(Container)	0.8654	-0.0046	0.8697	-0.3641
	K(RO/RO)	0.8078	-0.0169	0.7326	-0.4178
	L(Car carrier)	0.8322	-0.0202	0.7907	-0.4323
	M(LNG)	0.6748	-0.0101	0.4161	-0.3881

아래의 Fig. 4.3(b)에서 대상 어선의 선형 미계수 값은 대체적으로 선체를 구성하는 제원의 비율이 비슷한 VLCC, ULCC, Cargo와 유사한 경향을 나타낸 것과는 달리 횡력 성분의 미계수 값은 Fig. 4.2(a)와 같이 선체의 비대도를 나타내는 계수 C_b 가 비슷한 Container와 유사한 경향을 나타내고 있음을 확인하였다.

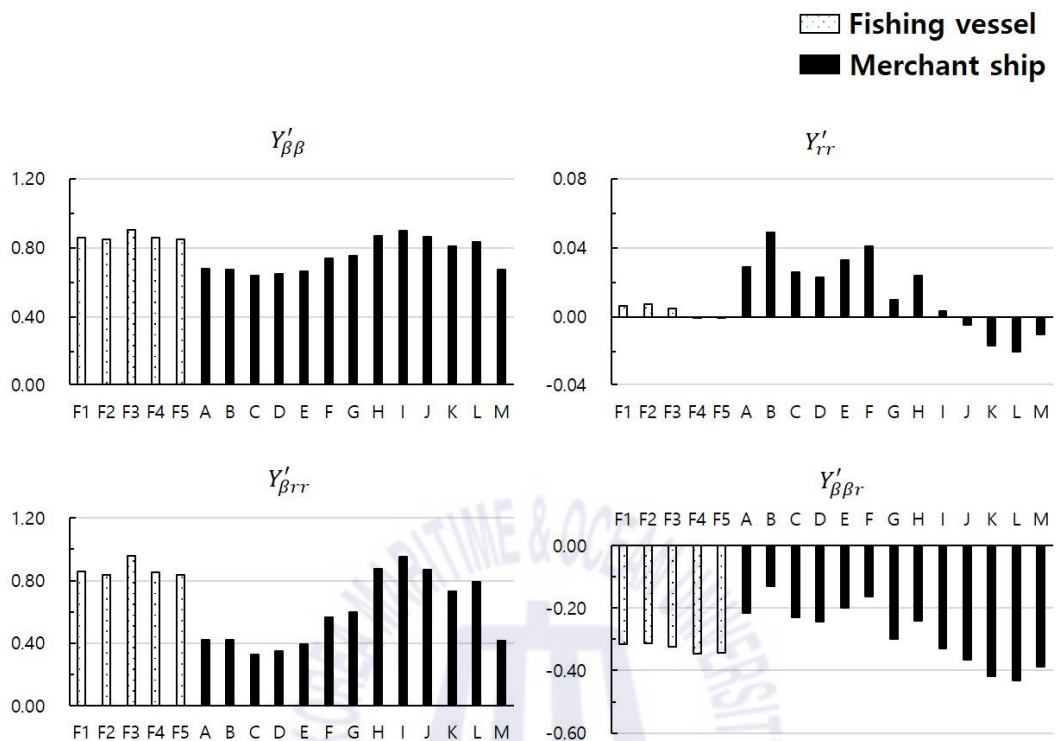


Fig. 4.3(b) Comparison of non-linear(lateral force) derivatives

Table 4.3(c) Comparison of non-linear(moment) derivatives

Type of ship		Nonlinear derivatives (Yaw moment)			
		$N'_{\beta\beta}$	N'_{rr}	$N'_{\beta rr}$	$N'_{\beta\beta r}$
Fishing vessel	F1(Stern trawler)	-0.0723	-0.0317	-0.0613	-0.2366
	F2(Stern trawler)	-0.0689	-0.0275	-0.0627	-0.1983
	F3(Stern trawler)	-0.0889	-0.0377	-0.0587	-0.3051
	F4(Stern trawler)	-0.0714	-0.0382	-0.0518	-0.3108
	F5(Stern trawler)	-0.0687	-0.0363	-0.0519	-0.2877
Merchant ship	A(VLCC)	-0.0024	-0.0201	-0.0944	-0.1513
	B(VLCC)	-0.0016	-0.0222	-0.1231	-0.1622
	C(ULCC)	0.0130	-0.0122	-0.0898	-0.1291
	D(ULCC)	0.0093	0.0011	-0.0854	-0.1565
	E(ULCC)	0.0028	-0.0080	-0.1001	-0.1289
	F(Cargo)	-0.0253	-0.0269	-0.1120	-0.1939
	G(Cargo)	-0.0309	-0.0315	-0.0666	-0.2344
	H(Cargo)	-0.0748	-0.0410	-0.0868	-0.3497
	I(Container)	-0.0880	-0.0486	-0.0570	-0.4698
	J(Container)	-0.0743	-0.0463	-0.0453	-0.4311
	K(RO/RO)	-0.0522	-0.0491	-0.0274	-0.4799
	L(Car carrier)	-0.0616	-0.0397	-0.0226	-0.3306
	M(LNG)	-0.0011	-0.0316	-0.0373	-0.2353

아래의 Fig. 4.3(c)에서 대상 어선의 모멘트와 관련된 미계수 값은 Fig. 4.3(a)에서 도시한 선형 미계수 값의 경향이나, Fig. 4.3(b)에 도시한 횡력 성분의 미계수 값이 나타내는 경향과는 다소 다른 경향을 나타냈다. 즉, $N'_{\beta\beta}$ 와 $N'_{\beta rr}$ 의 값은 C_b 가 비슷한 Container와 유사했고, N'_{rr} 와 $N'_{\beta\beta r}$ 의 값은 $C_b B/L$ 가 비슷한 Cargo, Car carrier, LNG와 유사한 경향을 나타내는 등의 어느 특정 선종과 유

사한 경향을 나타내지 않았다.

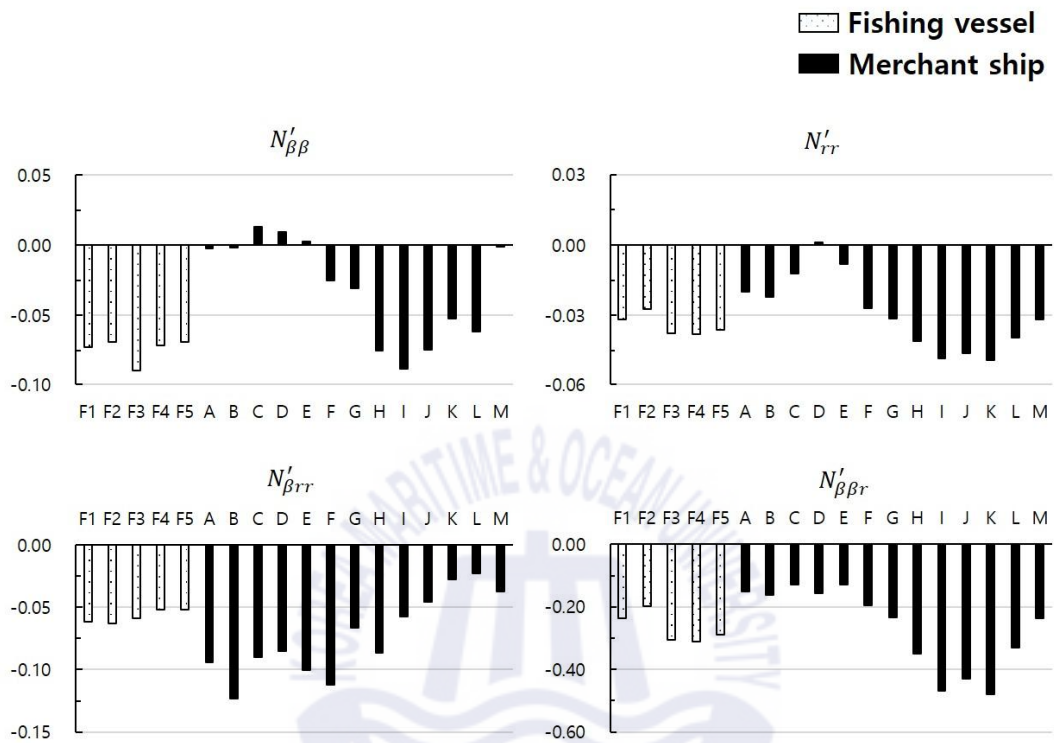


Fig. 4.3(c) Comparison of non-linear(moment) derivatives

Table 4.3(d) Comparison of interaction coefficients

Type of ship		Interaction coefficients					
		$1-t_R$	a_H	x_H'	ϵ	γ	$1-w_{P0}$
Fishing vessel	F1(Stern trawler)	0.7200	0.3357	-1.4264	0.9666	0.3808	0.7465
	F2(Stern trawler)	0.7225	0.3534	-1.3936	0.9994	0.3355	0.7420
	F3(Stern trawler)	0.7107	0.2742	-1.5333	0.8815	0.4396	0.7630
	F4(Stern trawler)	0.7144	0.2982	-1.4931	0.8735	0.4437	0.7564
	F5(Stern trawler)	0.7158	0.3077	-1.4767	0.9053	0.4265	0.7539
Merchant ship	A(VLCC)	0.7746	0.8007	-0.3625	1.0028	0.2485	0.6490
	B(VLCC)	0.7827	0.8847	-0.1411	1.0088	0.2744	0.6345
	C(ULCC)	0.7838	0.8966	-0.1093	0.9308	0.1453	0.6325
	D(ULCC)	0.7799	0.8553	-0.2193	0.6332	-0.0538	0.6395
	E(ULCC)	0.7796	0.8524	-0.2270	0.8612	0.0862	0.6400
	F(Cargo)	0.7664	0.7205	-0.5675	1.0021	0.3292	0.6635
	G(Cargo)	0.7454	0.5311	-1.0219	0.9689	0.3785	0.7010
	H(Cargo)	0.7323	0.4255	-1.2510	0.8157	0.4691	0.7245
	I(Container)	0.7101	0.2701	-1.5400	0.6151	0.5291	0.7642
	J(Container)	0.7085	0.2601	-1.5560	0.6825	0.5122	0.7670
	K(RO/RO)	0.7060	0.2445	-1.5801	0.5972	0.5332	0.7715
	L(Car carrier)	0.6962	0.1874	-1.6588	0.8446	0.4572	0.7890
	M(LNG)	0.7499	0.5694	-0.9342	0.9680	0.3794	0.6930

대상 어선의 간섭 계수 값 역시 마찬가지로 아래의 Fig. 4.3(d)에 나타낸 바와 같이 C_b 가 유사하거나, $C_b B/L$ 가 유사한 선종과 비슷한 경향을 나타냈다. 단, Table 4.3(d)에서 타력 증가 계수 a_H 와 무차원화된 부가 횡력의 종축 방향 작용점 x'_H 의 값은 2.3절에서 서술한 바와 같이 Kijima et al.(1990)이 제시한 식으로부터 도출한 이론적인 값이며, 수조 시험에 의하면 a_H 는 거의 0.3 ~ 0.4정도의 크기를 가지고 x'_H 의 측정값은 대략 $-0.45L_{pp}$ 이다.



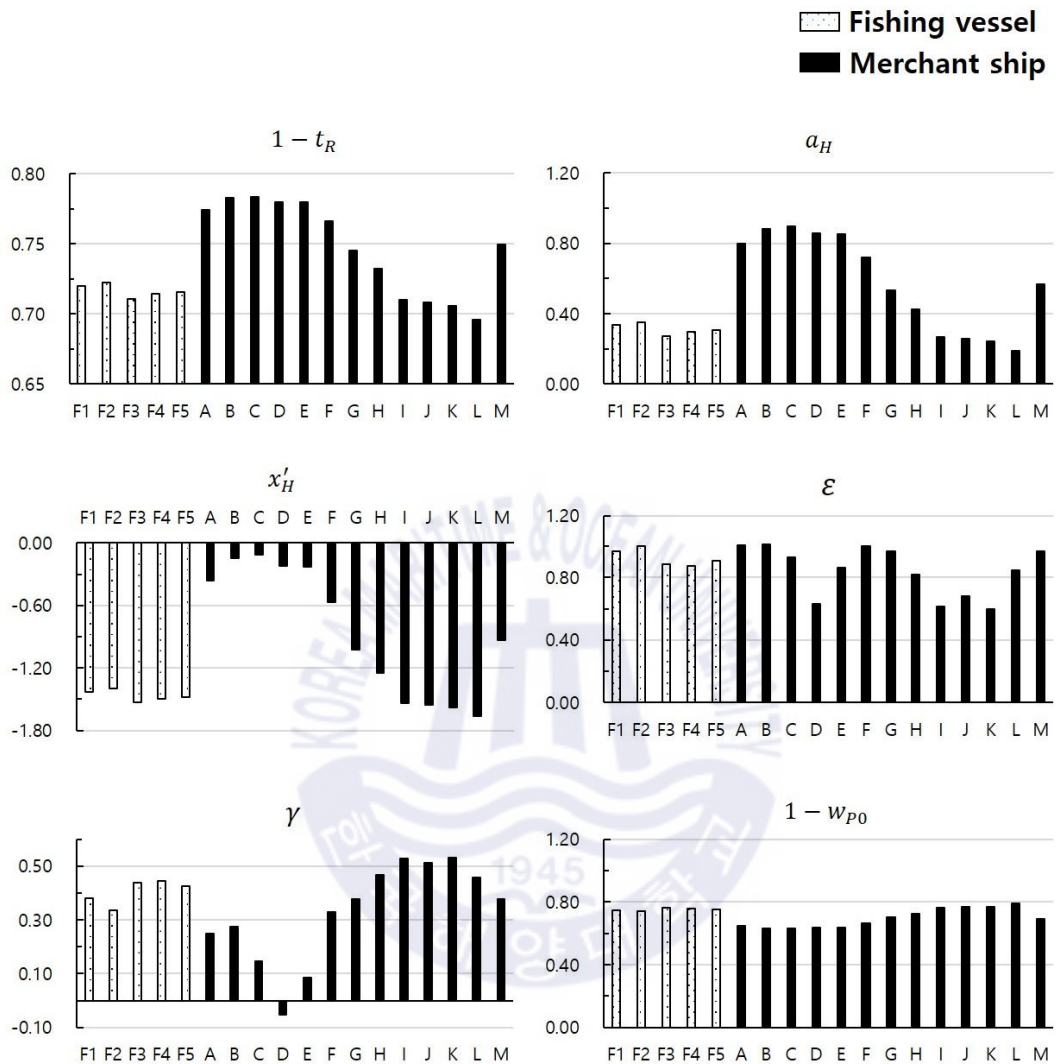


Fig. 4.3(d) Comparison of interaction coefficients

상기의 Table 4.3(a) ~ (d)와 Fig. 4.3(a) ~ (d)를 통하여 확인한 바와 같이, 대상 어선의 특정 미계수 값은 선체 기본 제원 $k(=2d/L)$, L/B , B/d 등과 같이 비율이 비슷한 선종인 VLCC, Cargo 등이 나타내는 값과 유사한 경향을 나타내기도 하였고, 일부 다른 미계수 값은 선체 비대도를 나타내는 계수 C_b 가 비슷한 선종인 Container, Car carrier와 유사한 경향을 나타내고 있음을 확인하

였다.

이와 같은 결과는 2.3절의 식 (28)에 견주어 보았을 때, 각각의 미계수 값을 도출하는 항에 제시되어 있는 선형 특성 계수나 제원이 비슷한 선종과 유사한 값을 나타내었다. 즉, 경험식 구성에서 C_b 가 포함되어 있으면 Container, Car carrier 등과 유사한 경향의 값을 나타내었고, $k(=2d/L)$, L/B , B/d 등이 포함되어 있으면 VLCC, ULCC, Cargo 등과 유사한 경향의 값을 나타내는 것이다.

결국, 대상 어선의 선형은 경험식을 개발하는 모형시험 과정에 포함되지 않았기 때문에 경험식을 통하여 트롤 어선 선형이 가지는 고유한 미계수 값의 특성을 나타낼 수 없었다. 특히, 회귀분석 과정에서 높은 상관관계를 가지는 복잡한 선형 특성 계수 $C_b B/L$ 나 제원의 비율 $k(=2d/L)$ 등은 VLCC나 Container와도 전혀 다른 고유한 특성을 가지기 때문에 이러한 계수들의 불포함은 미계수 값의 오차로 나타남과 동시에 조종성능 추정에 대한 오차로 이어졌을 것으로 판단되었다.

따라서 Formula 1990을 이용하여 트롤 어선의 조종성능을 추정하기 위해서는 선형 특성 계수를 비롯하여 트롤 어선 선형이 갖는 고유한 계수를 포함시킬 필요가 있다고 판단하였다. 한편, 이와 같은 과정은 경험식 개발 단계에서 모형시험 결과를 포함시키는 것부터 수행되어야 하나, 어선의 경우는 서론에서 서술한 바와 같이 규모가 작고 예산 절감 등의 이유로 모형시험 결과 자체가 부족한 실정이기 때문에 본 논문에서는 트롤 어선 선형의 특성 계수를 경험식에 포함시켜 Formula 1990을 보정시키는 방법을 이용하였다.

4.4 보정 경험식 도출

3장을 통하여 상선 선형을 대상으로 만들어진 경험식을 트롤 어선 선형에 적용하였을 경우에는 선회성능 추정오차가 발생함을 실선 시험 결과와 비교하여 증명하였고, 4.1 ~ 4.3절을 통하여 일반적인 상선이 가지는 선형과는 다른 고유한 선형 특성을 가지고 있음을 확인하였다.

따라서 이 절에서는 Formula 1990을 이용하여 도출한 대상 선박의 조종 유체

력 미계수 값과 미계수 값을 도출함에 있어서 상관관계를 가지는 특성 계수들과의 관계를 그래프를 이용하여 나타내고, 대상 어선과 대상 상선의 선형이 나타내는 분포 차이의 정도를 추세식을 이용하여 보정시킴으로써 트롤 어선 선형의 특성 계수가 포함된 보정 경험식을 도출하였다.

4.4.1 상관관계 그래프

4.2절의 Table 4.3에서 도출하였던 대상 선박들의 선형 특성 계수와 4.3절의 조종 유체력 미계수의 상관관계 그래프를 Fig. 4.4(a) ~ (r)과 같이 나타내고, 각각의 미계수 값에 대한 대상 어선과 대상 상선의 선형 특성 계수들이 가지는 분포의 차이를 분석하였다.



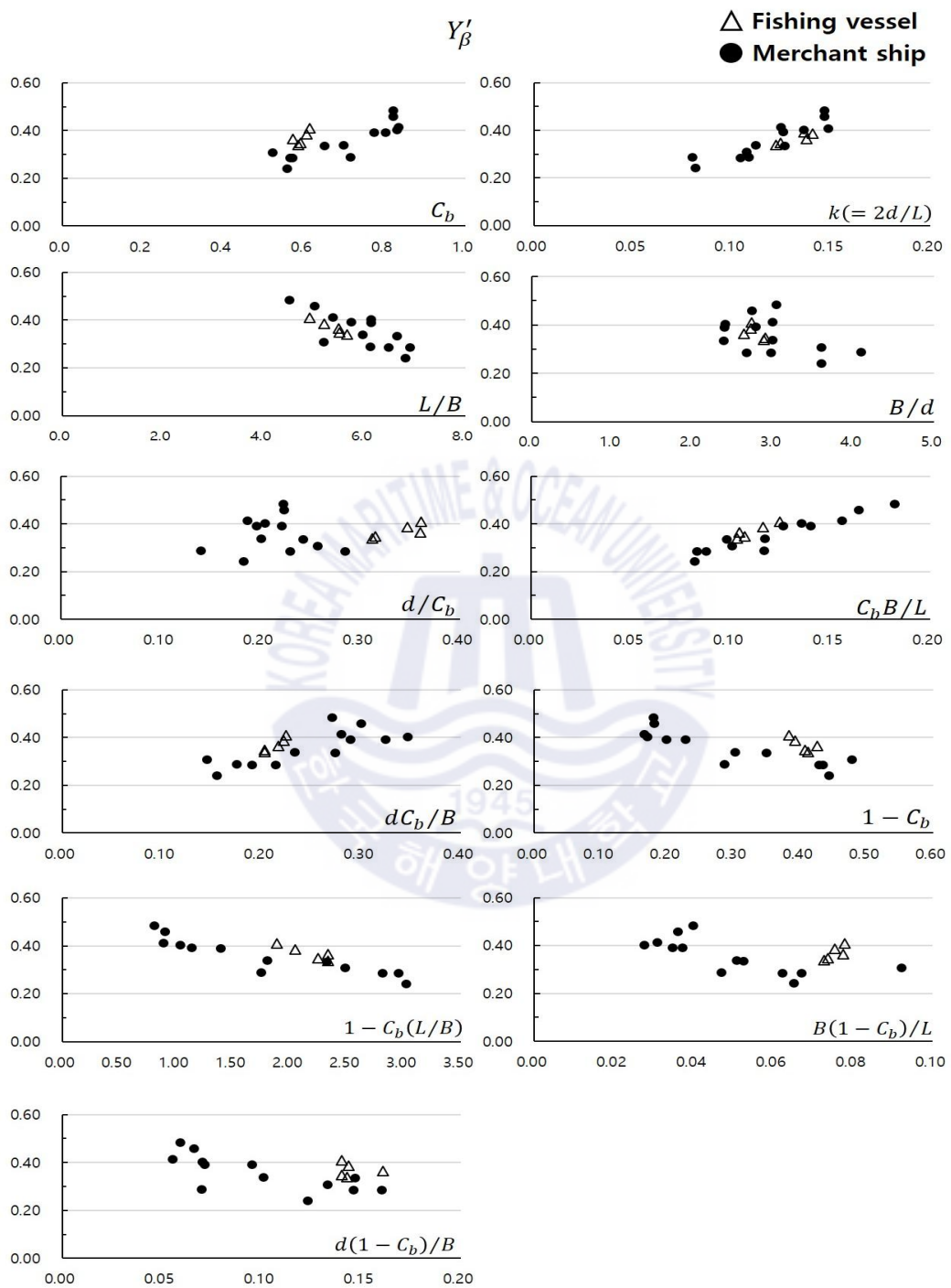


Fig. 4.4(a) Correlation between Y'_β and hull shape parameters

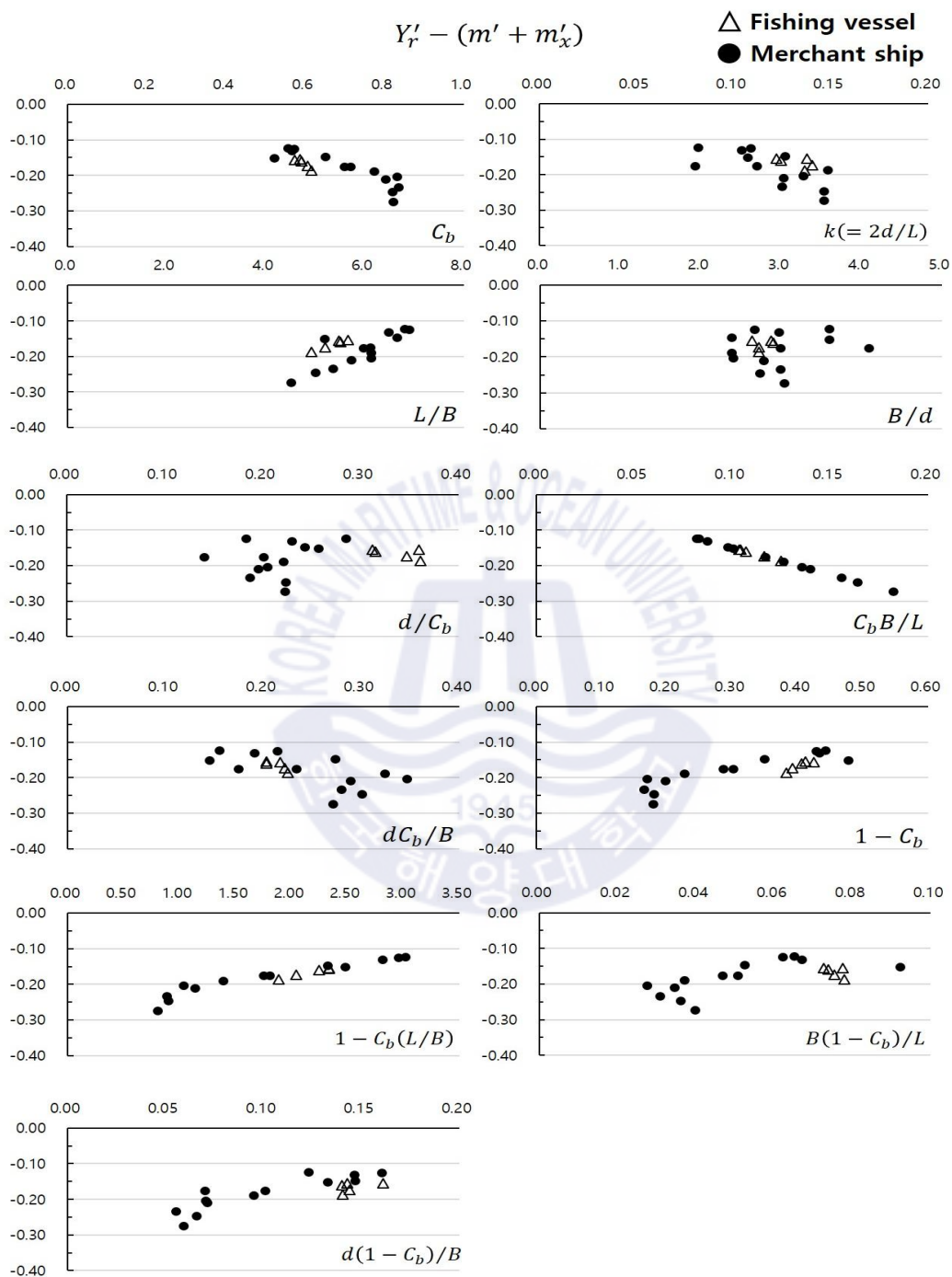


Fig.4.4(b) Correlation between $Y'_r - (m' + m'_x)$ and hull shape parameters

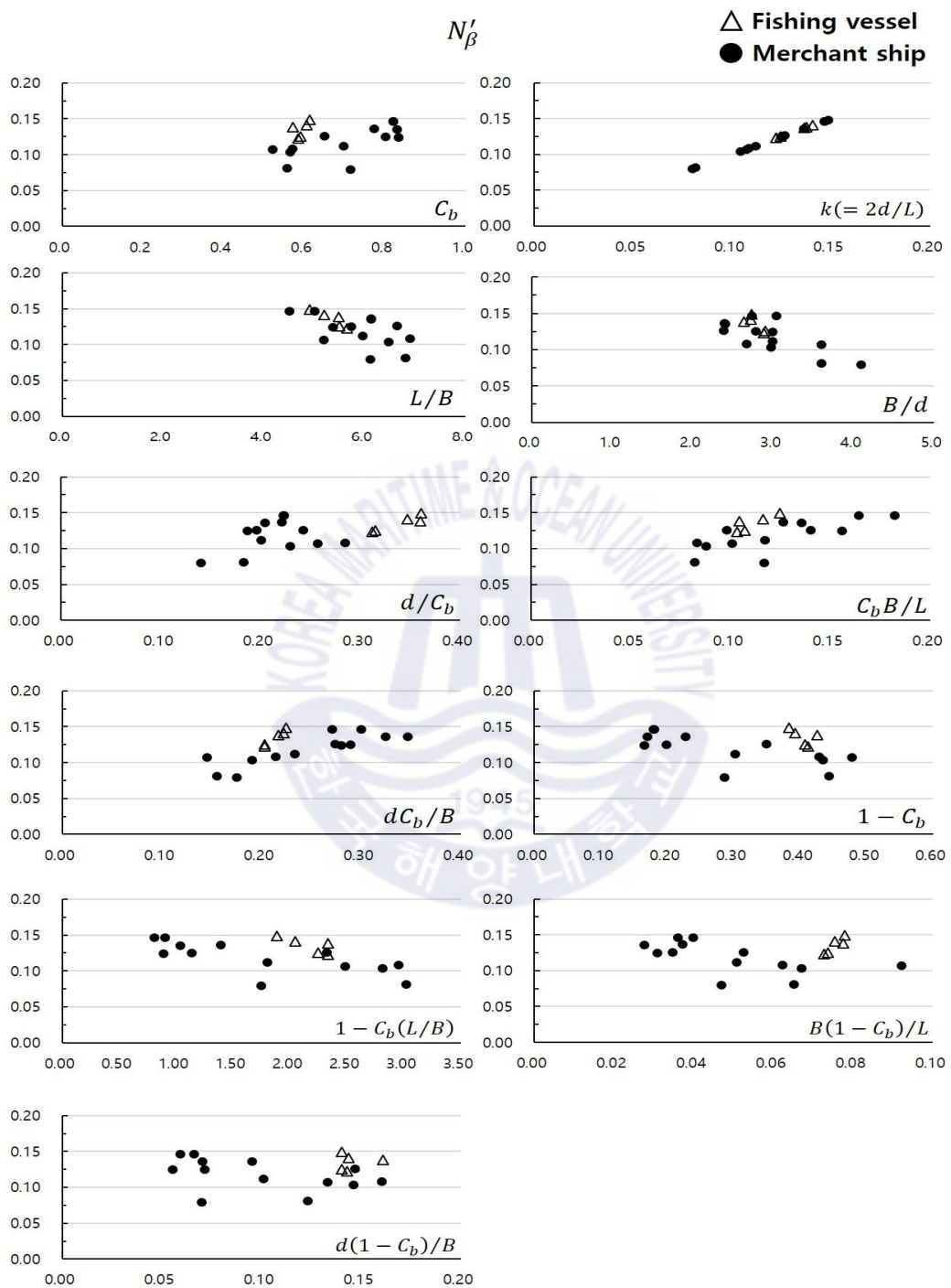


Fig. 4.4(c) Correlation between N'_β and hull shape parameters

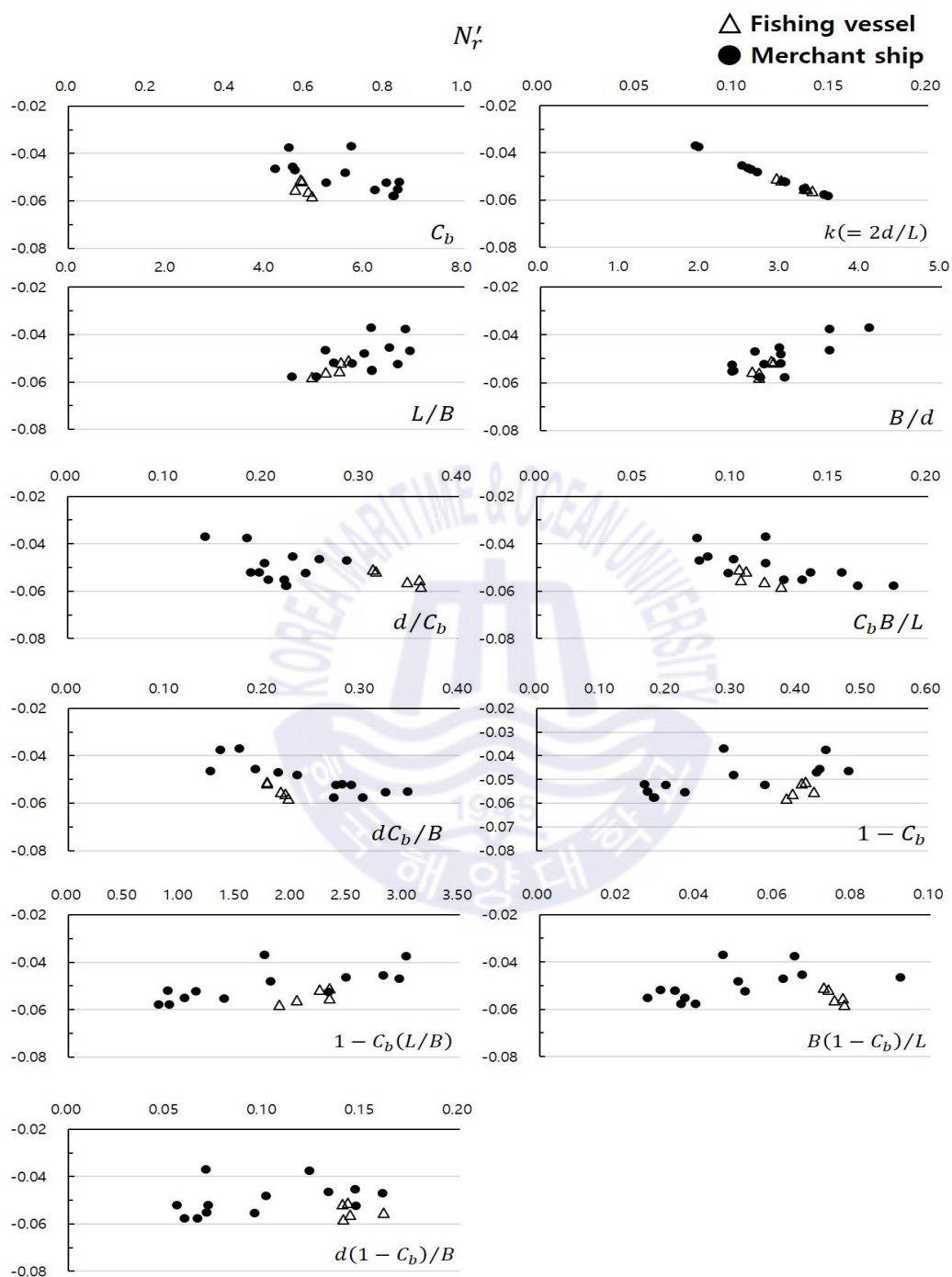


Fig. 4.4(d) Correlation between N'_r and hull shape parameters

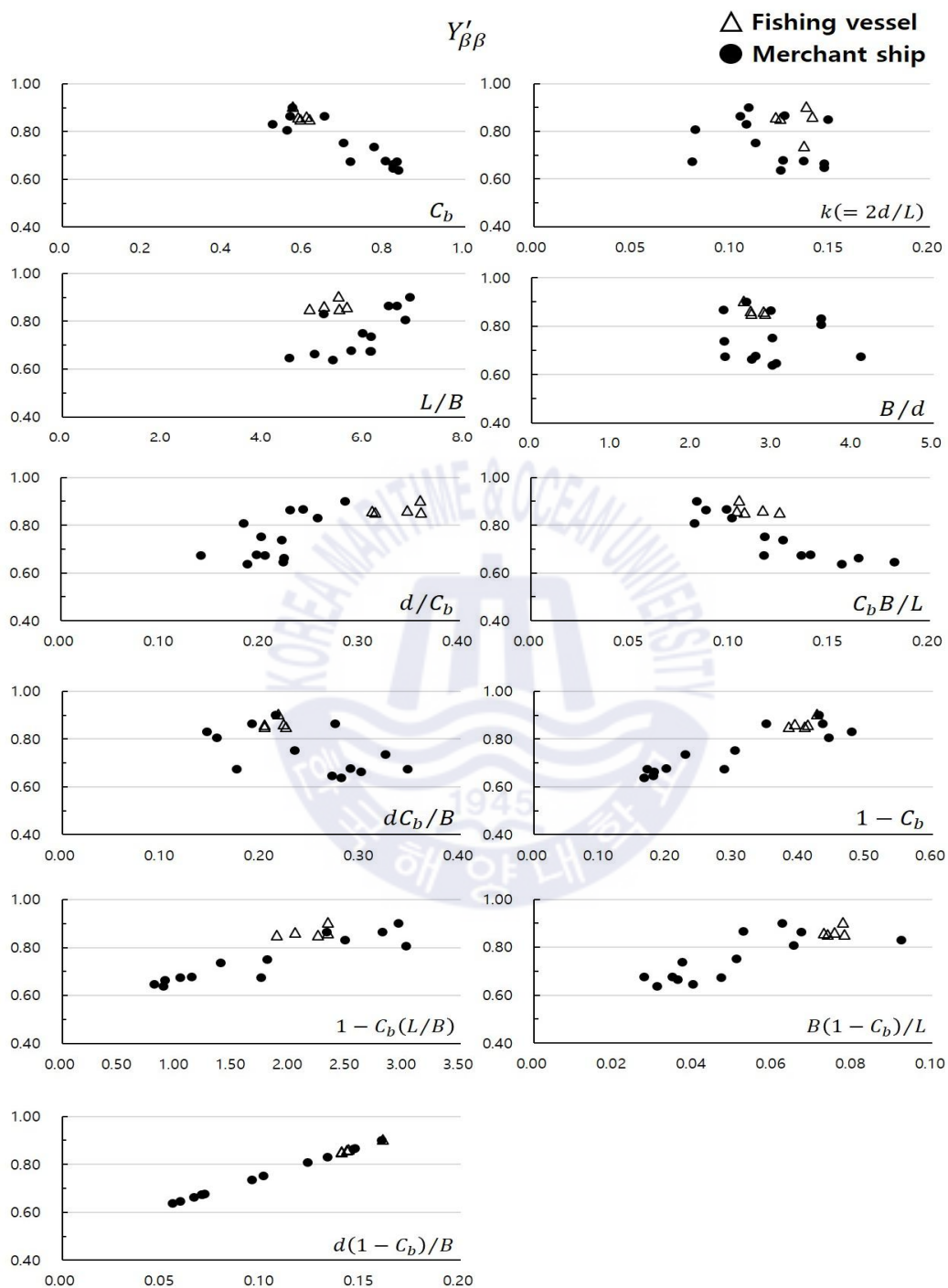


Fig. 4.4(e) Correlation between $Y'_{\beta\beta}$ and hull shape parameters

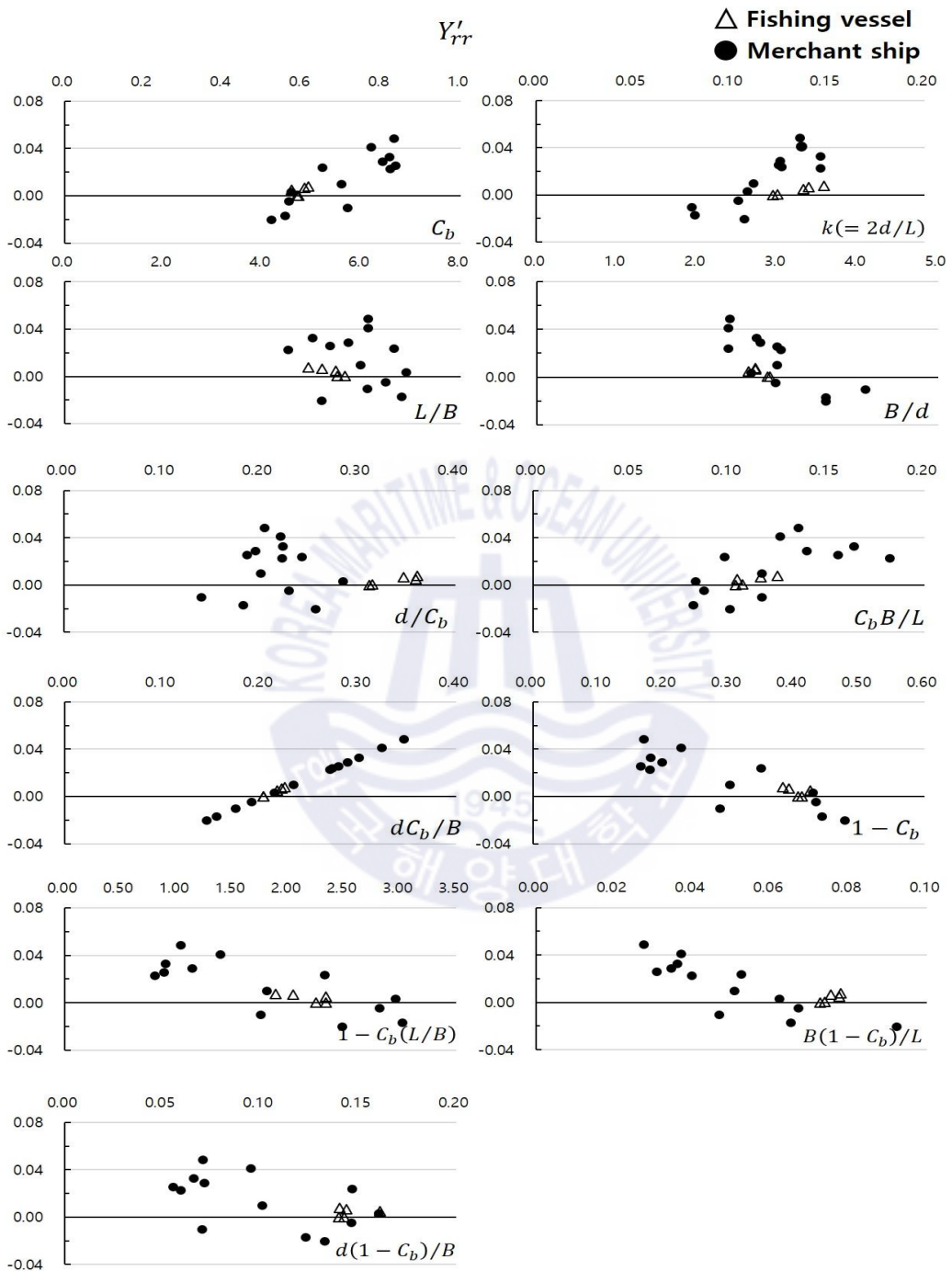


Fig. 4.4(f) Correlation between Y'_{rr} and hull shape parameters

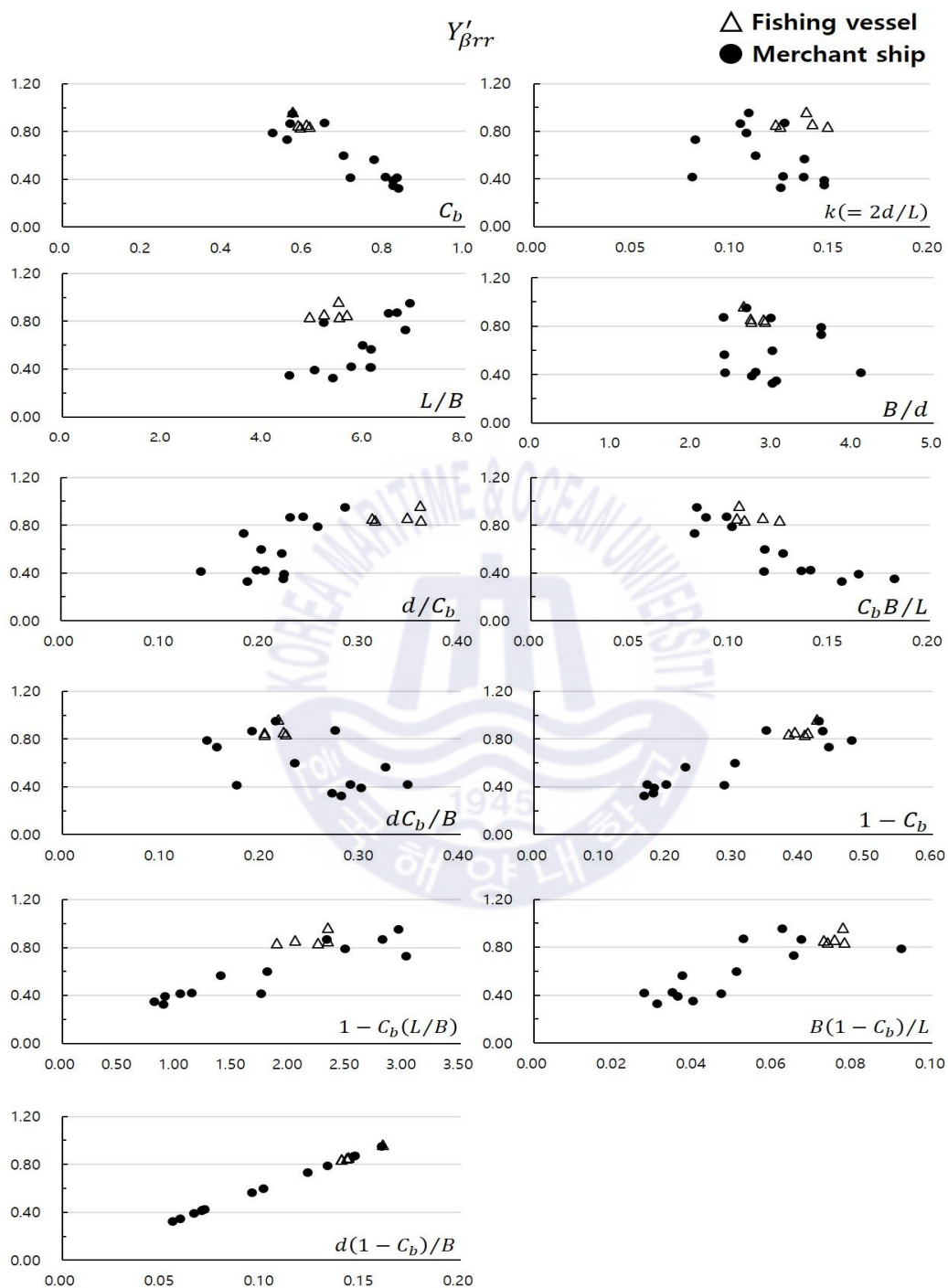


Fig. 4.4(g) Correlation between $Y'_{\beta rr}$ and hull shape parameters

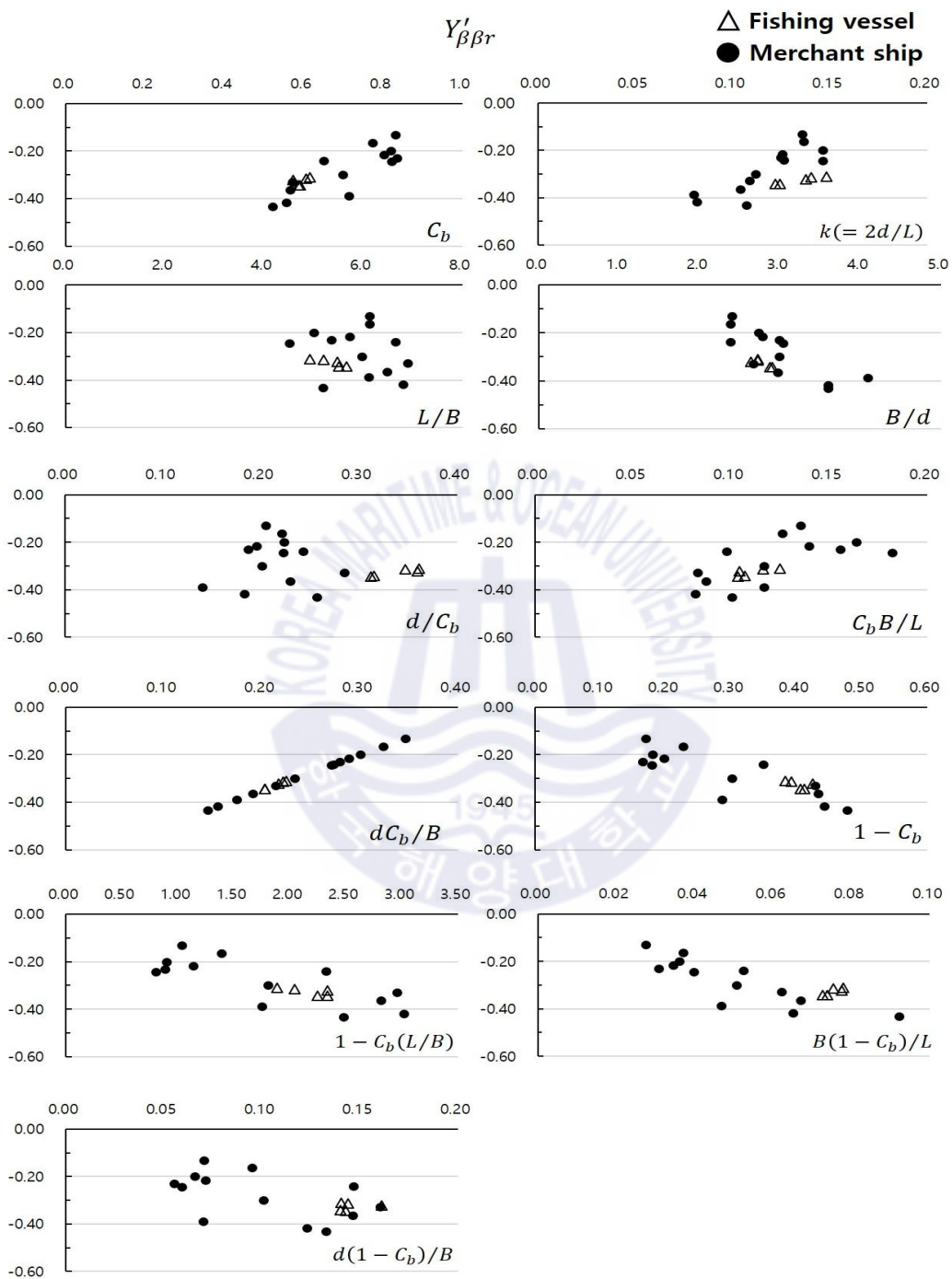


Fig. 4.4(h) Correlation between $Y'_{\beta\beta r}$ and hull shape parameters

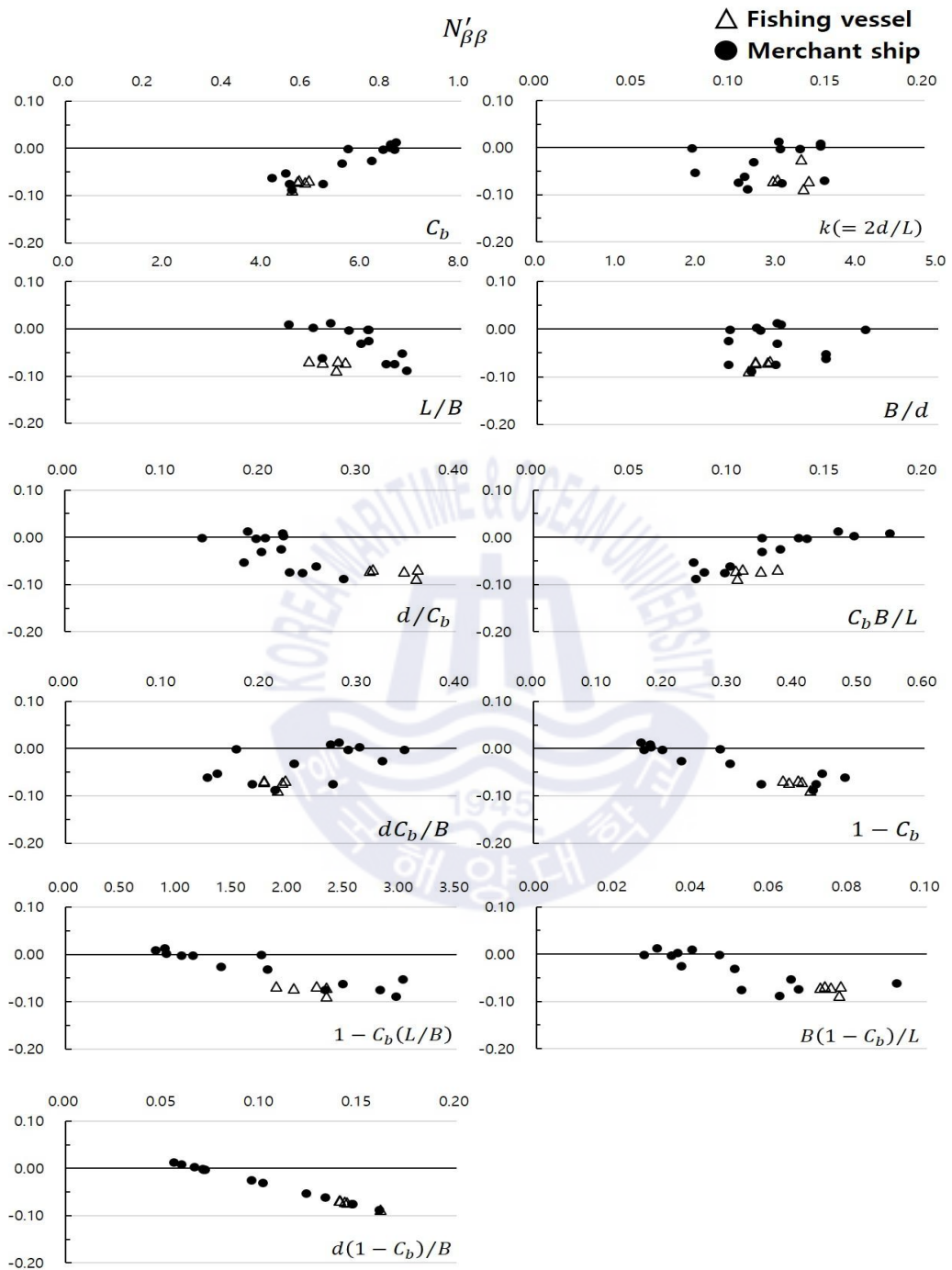


Fig. 4.4(i) Correlation between $N'_{\beta\beta}$ and hull shape parameters

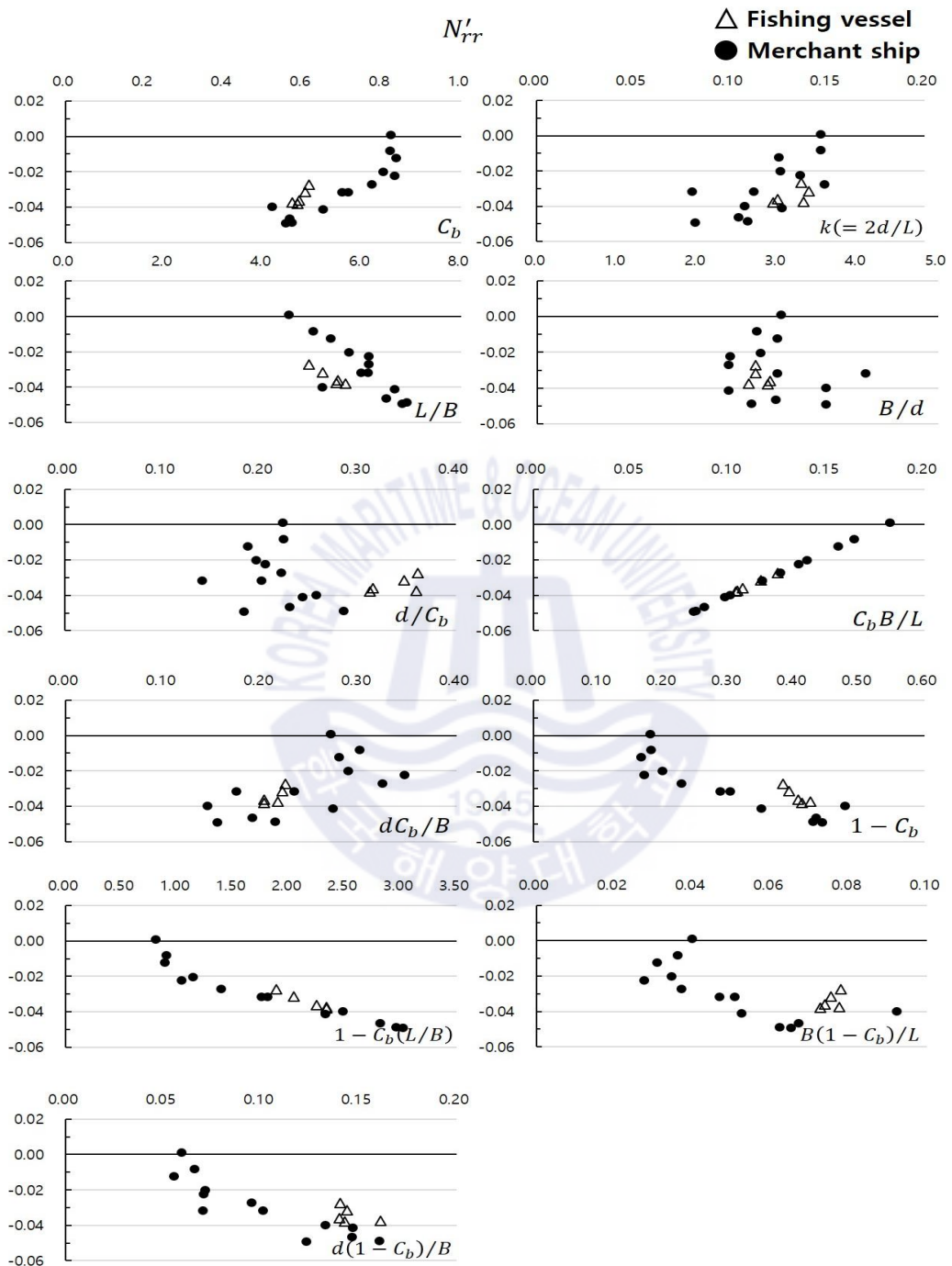


Fig. 4.4(j) Correlation between N'_{rr} and hull shape parameters

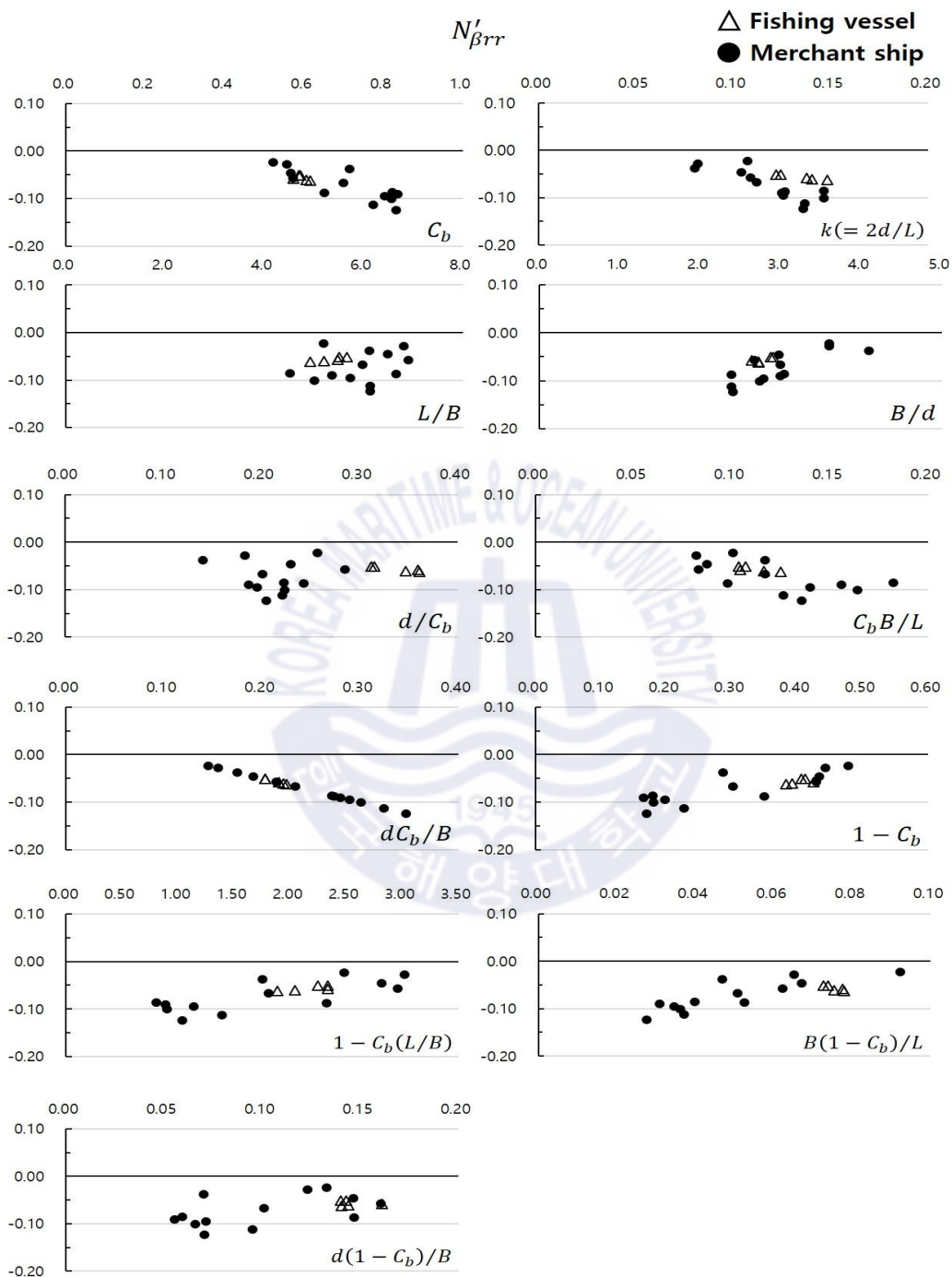


Fig. 4.4(k) Correlation between $N'_{\beta rr}$ and hull shape parameters

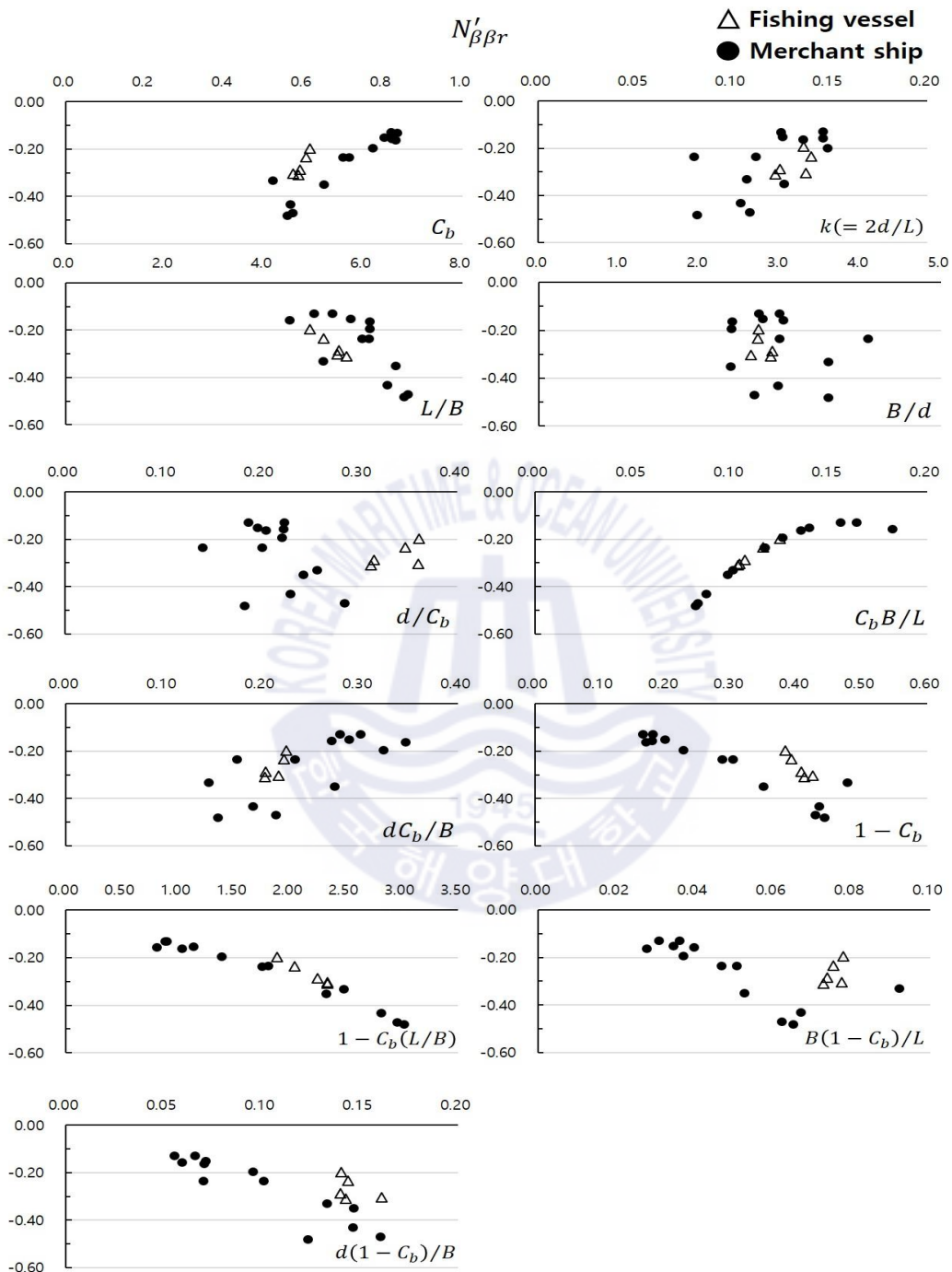


Fig. 4.4(l) Correlation between $N'_{\beta\beta r}$ and hull shape parameters

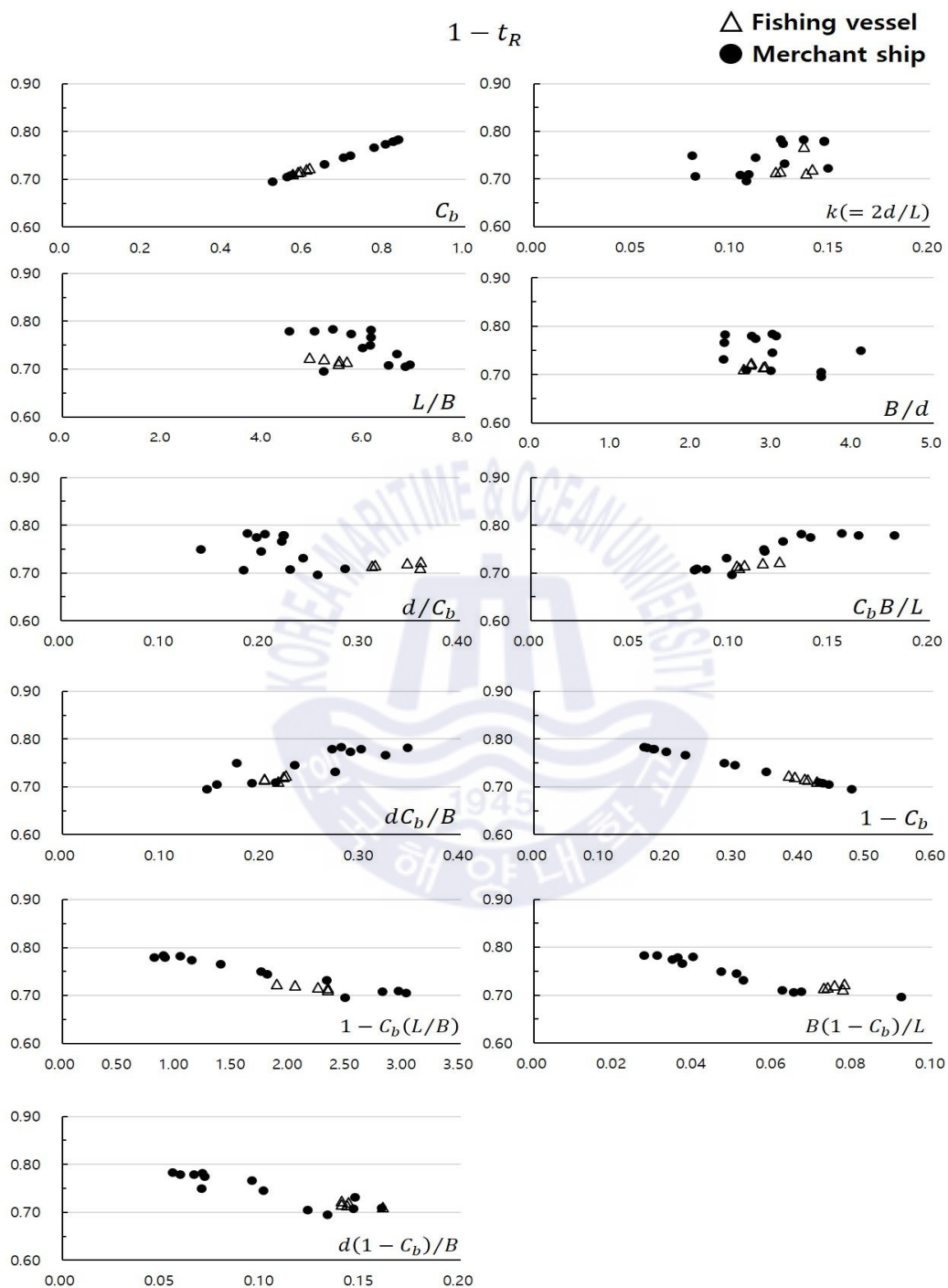


Fig. 4.4(m) Correlation between $1 - t_R$ and hull shape parameters

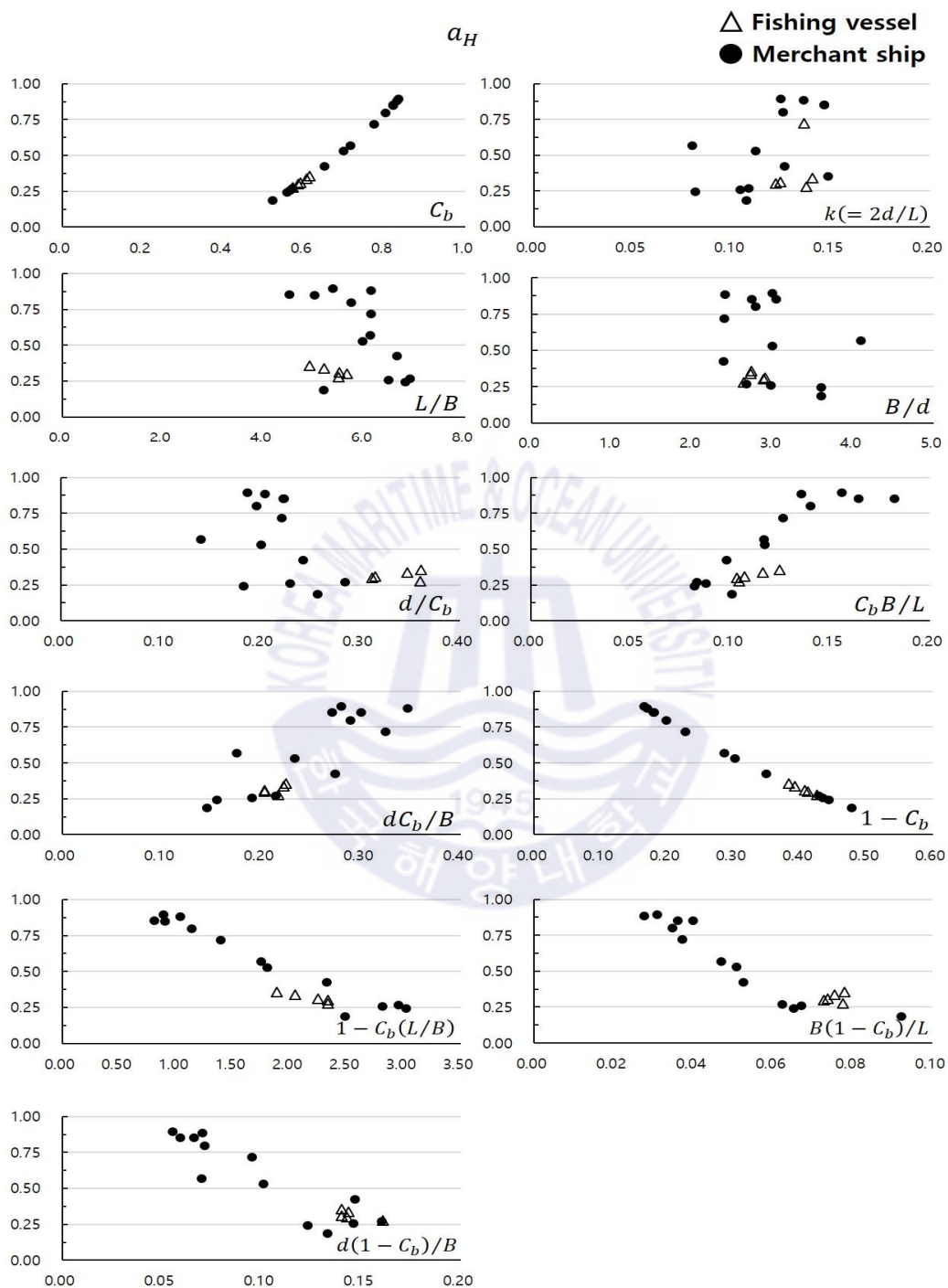


Fig. 4.4(n) Correlation between a_H and hull shape parameters

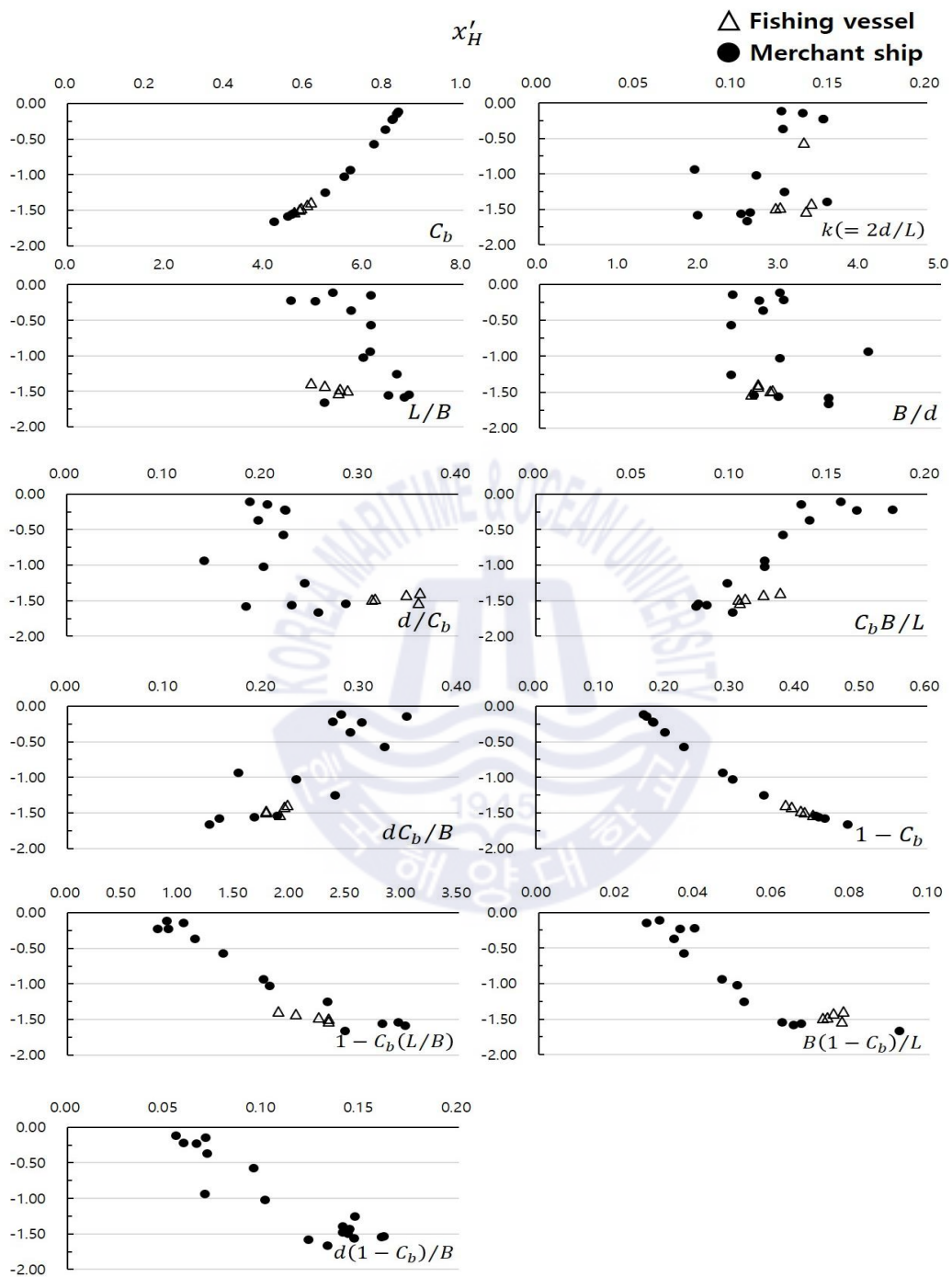


Fig. 4.4(o) Correlation between x'_H and hull shape parameters

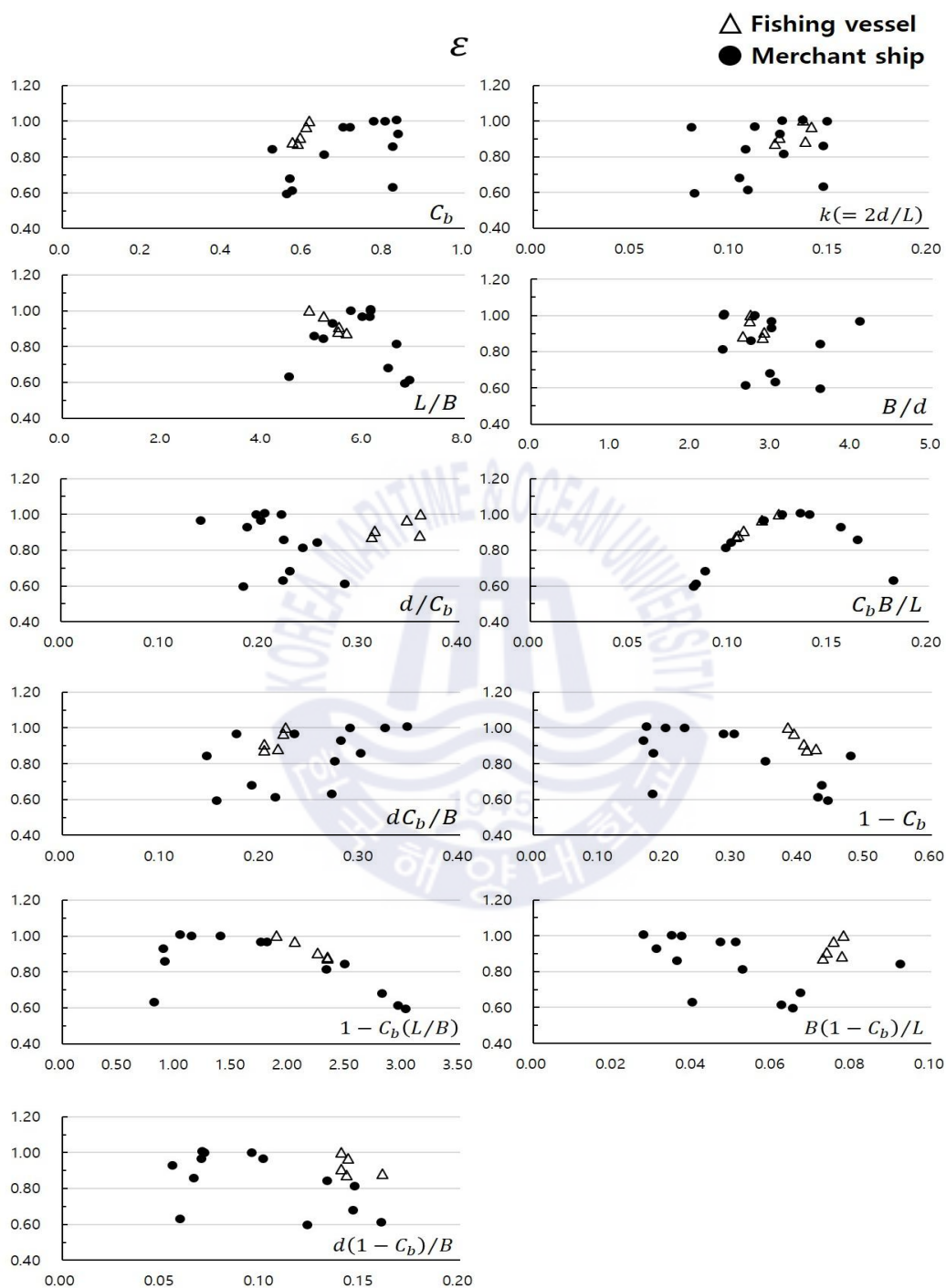


Fig. 4.4(p) Correlation between ε and hull shape parameters

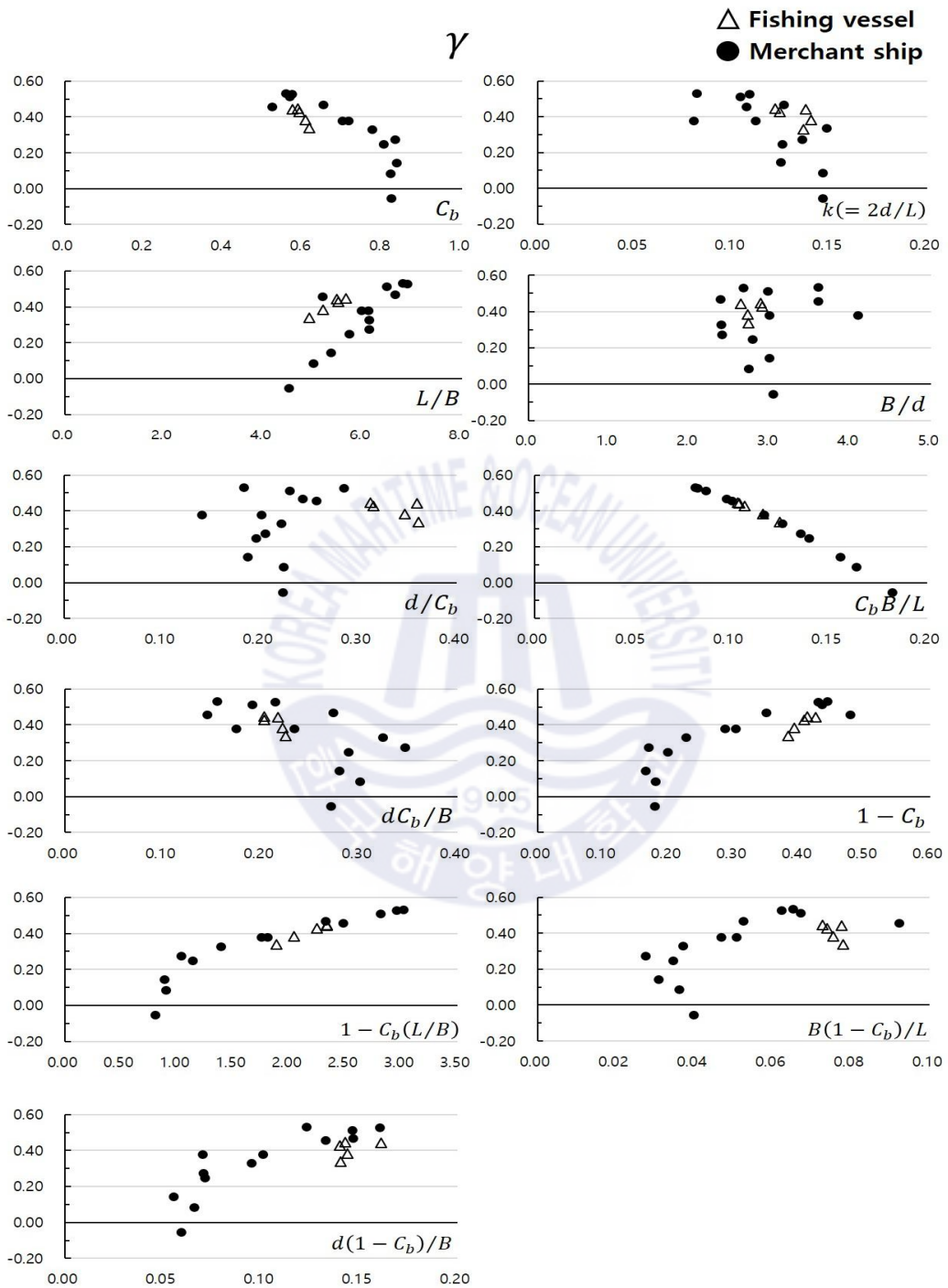


Fig. 4.4(q) Correlation between γ and hull shape parameters

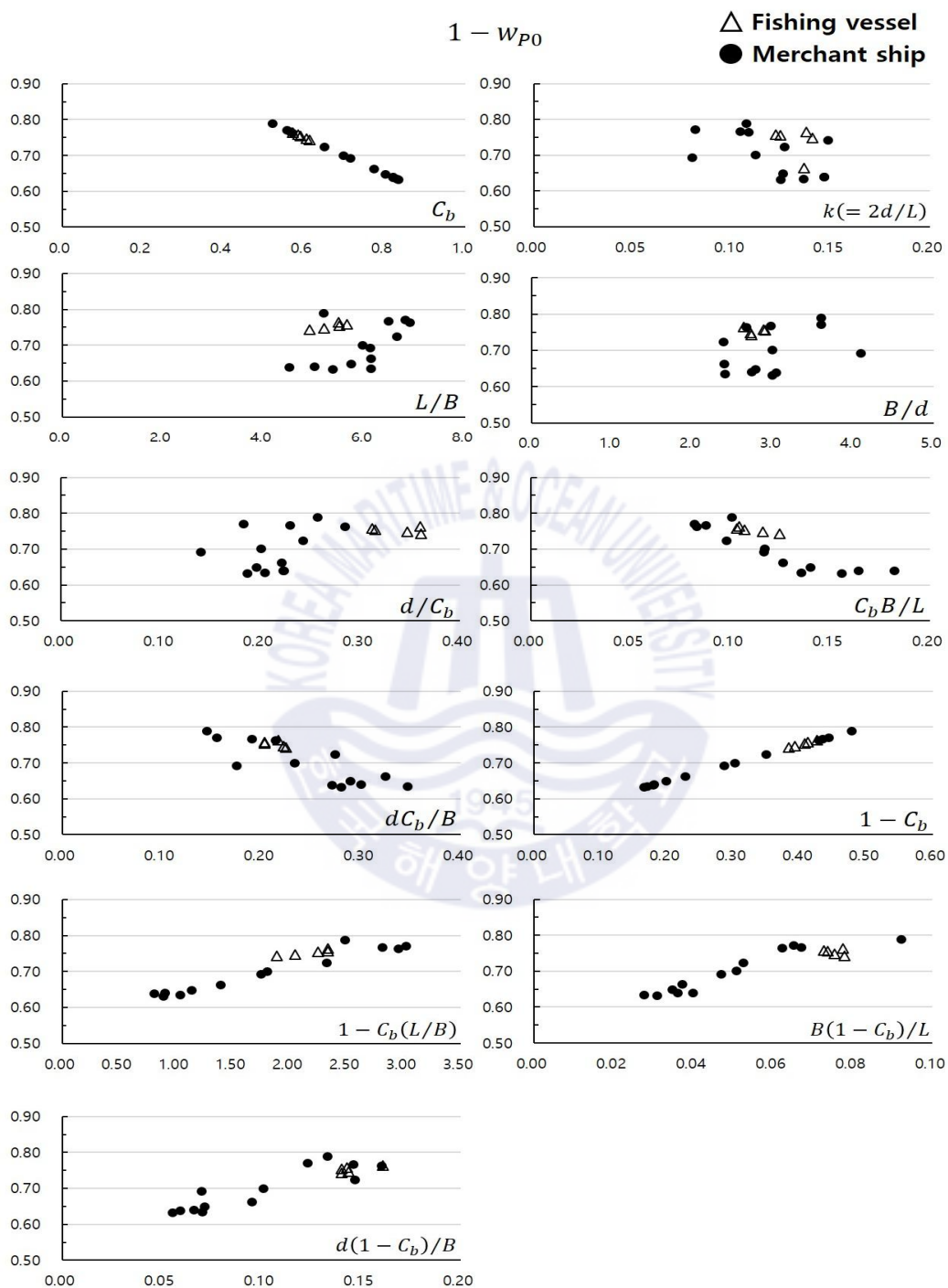


Fig. 4.4(r) Correlation between $1 - w_{P0}$ and hull shape parameters

여기서, Fig. 4.4(a) ~ (r)에 도시된 각각의 그래프에서 세로축은 조종 유체력 미계수 값을 나타내며, 가로축은 해당 유체력 미계수 값을 도출함에 있어서 상관관계를 가지는 계수를 나타낸다.

그림에서 확인한 바와 같이 대상 선박의 선형 특성 계수 중에서 미계수 값 도출 항에 이미 포함되어 있는 계수는 해당 미계수와의 상관관계에서 일정한 방향성을 가진 규칙적인 분포를 나타내고 있었으며, 일부 상관 정도가 낮은 계수는 미소한 차이를 보이고 있음을 확인하였다. 그러나 몇몇 상관관계 그래프에 있어서는 대상 어선과 대상 산선의 선형이 나타내는 값이 미소하게 다른 범주를 나타내고 있었으며, 특히 C_b , L/B , B/d 등 회귀분석 과정에서 높은 상관관계를 가짐에도 불구하고 다소 다른 범주를 나타내는 그래프 역시 확인되었다.

4.4.2 경험식 도출

Fig. 4.4(a) ~ (r)에 도시하였던 대상 선박들의 조종 유체력 미계수 값과 선형 특성 계수의 상관관계 그래프에서 어선 선형과 상선 선형은 전반적으로 유사한 경향을 나타내었으나, C_b 나 L/B 등의 높은 상관관계를 가짐에도 불구하고 다소 다른 범주의 분포를 보이는 그래프가 있었다. 이러한 오차는 앞에서 서술한 바와 같이 모형시험 결과에 트롤 어선 선형이 포함되지 않았기 때문에 트롤 어선 선형이 가지는 고유한 선형 특성 계수를 나타낼 수 없는 것으로 판단되었다. 따라서 상선 선형이 나타내는 일정한 범주와 다소 다른 범주를 나타내는 그래프를 아래의 Fig. 4.5(a) ~ (d)와 같이 도시하였고, 도시된 그래프 중에서 해당 미계수 값 도출에 높은 상관관계를 가지는 값에 대하여 추세식을 이용한 보정 경험식을 도출하였다.

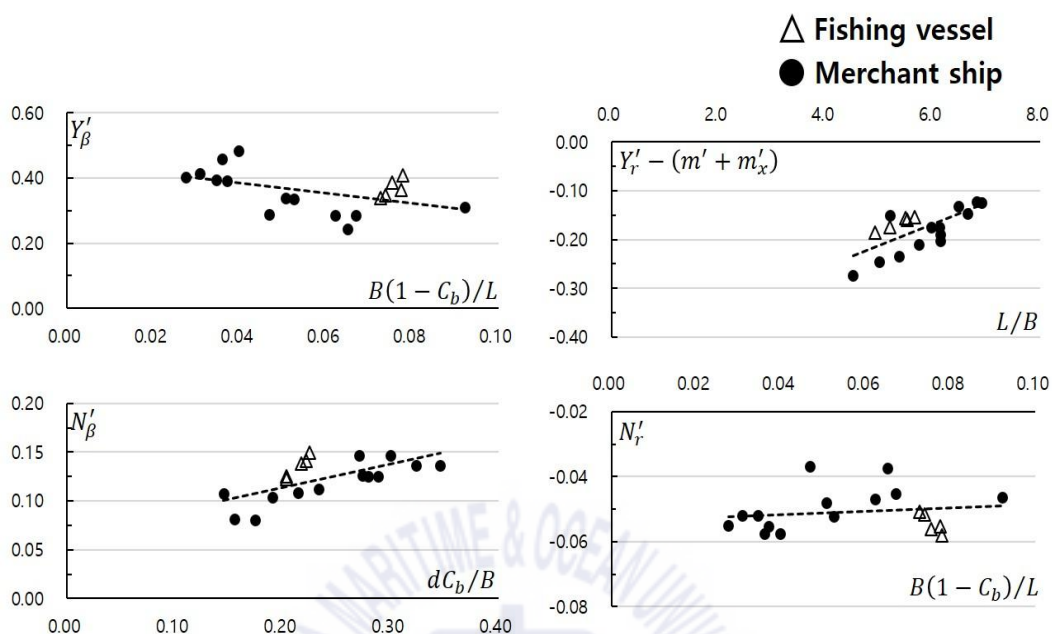


Fig. 4.5(a) Trendline between linear derivatives and hull shape parameters

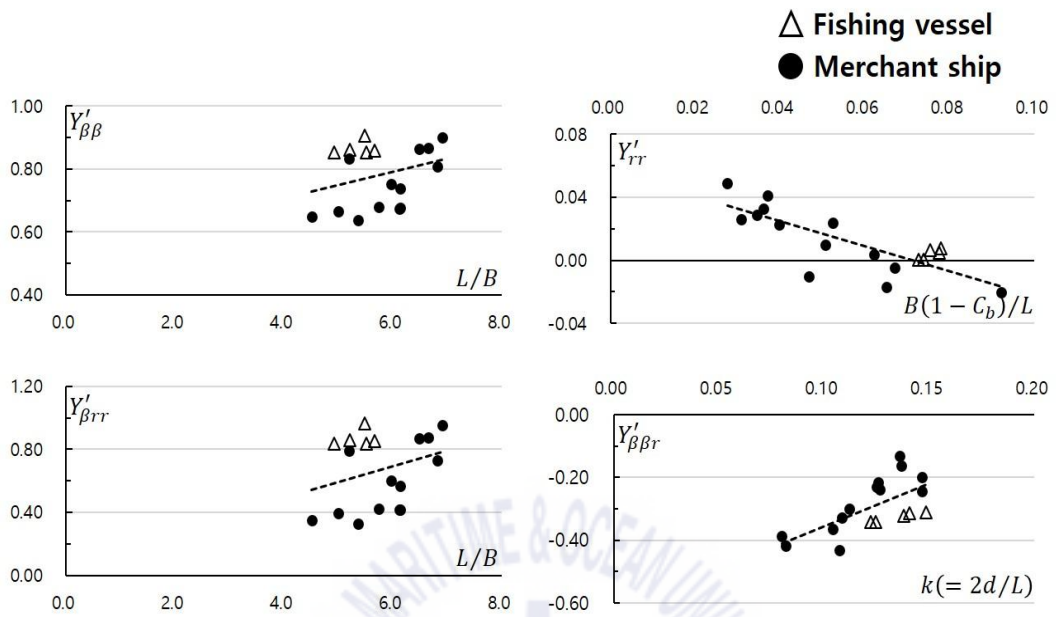


Fig. 4.5(b) Trendline between nonlinear(lateral force) derivatives and hull shape parameters

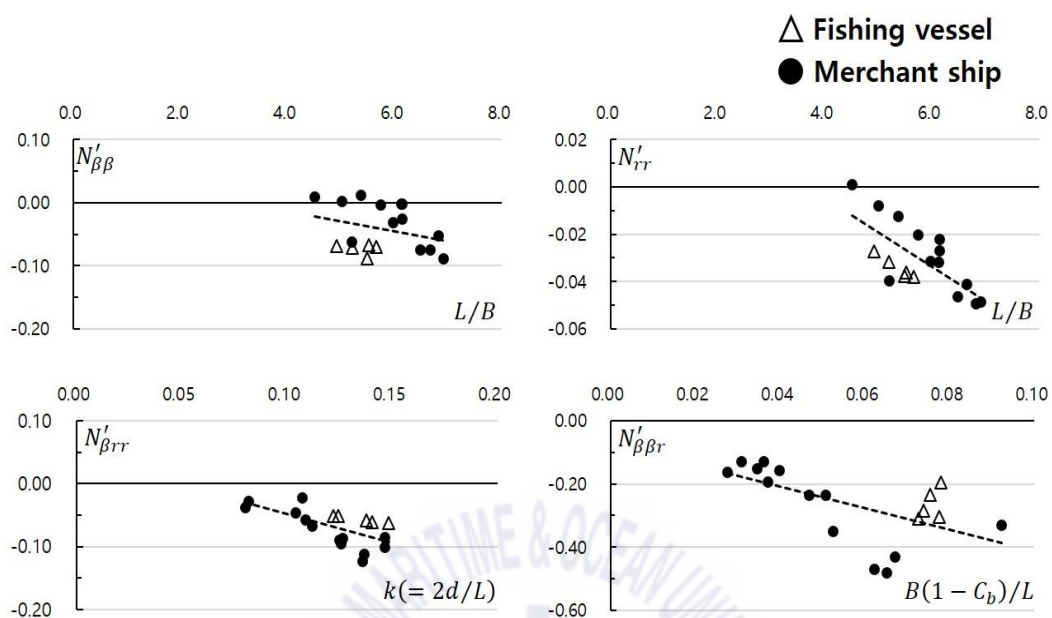


Fig. 4.5(c) Trendline between nonlinear(moment) derivatives and hull shape parameters

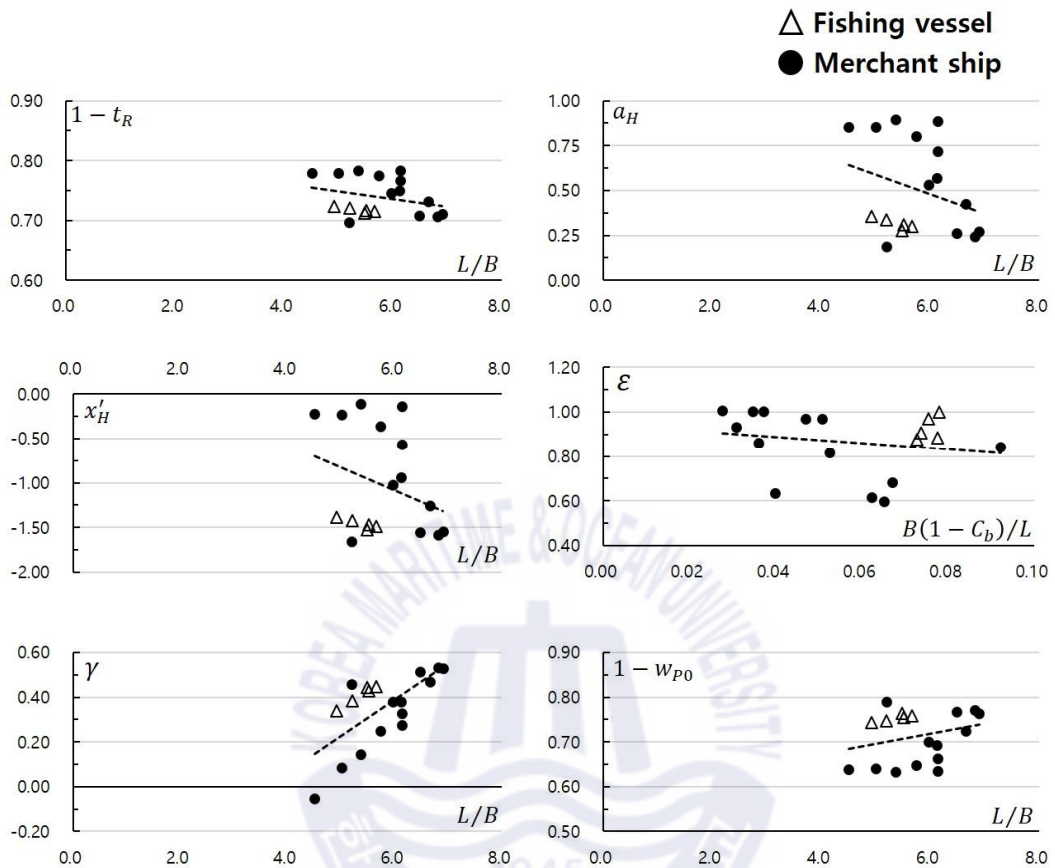


Fig. 4.5(d) Trendline between interaction coefficients and hull shape parameters

상기 Fig. 4.5(a) ~ (d)에 도시된 각각에 그래프에서 세로축은 해당 미계수 값을 나타내며 가로축은 해당 미계수 값을 도출함에 있어서 높은 상관관계를 가지나, 대상 어선과 대상 상선의 선형이 다소 다른 범위의 분포를 가지는 계수 값을 나타낸다. 그림에서 확인한 바와 같이 대상 어선 선형은 대상 상선의 선형과 비교하였을 때, 대부분의 조종 유체력 미계수 값이 회귀분석 과정에서 높은 상관관계를 가지는 L/B 에 대하여 다소 차이를 나타냈고, 이외에도 선체 제원의 비율 $k(=2d/L)$ 나 선체의 비만도 $C_b B/L$ 등의 계수들과의 상관 그래프

에 있어서도 미소한 차이를 보이고 있었다. 이에, 추세선을 이용하여 평균화시킴으로써 아래의 식 (35)와 같이 해당 미계수 값 도출에 높은 상관관계를 가지는 어선 선형 특성 계수를 포함시킨 보정된 경험식을 도출하였다.

$$Y'_{\beta} = -1.5747 B(1 - C_b)/L + 0.4488 \quad (35)$$

$$Y'_r - (m' + m'_x) = 0.0432 L/B - 0.4276$$

$$Y'_{\beta\beta} = 0.0417 L/B + 0.541$$

$$Y'_{rr} = -0.7946 B(1 - C_b)/L + 0.0563$$

$$Y'_{\beta rr} = 0.0993 L/B + 0.0975$$

$$Y'_{\beta\beta r} = 2.7467 k - 0.6316$$

$$N'_{\beta} = 0.238 d C_b/B + 0.0663$$

$$N'_r = 0.0515 B(1 - C_b)/L - 0.0537$$

$$N'_{\beta\beta} = -0.016 L/B + 0.0503$$

$$N'_{rr} = -0.0144 L/B + 0.0525$$

$$N'_{\beta rr} = -0.9156 k + 0.0439$$

$$N'_{\beta\beta r} = -3.399 B(1 - C_b)/L - 0.0737$$

$$1-t_R = -0.0127 L/B + 0.8122$$

$$a_H = -0.1107 L/B + 1.1421$$

$$x_H' = -0.258 L/B + 0.4603$$

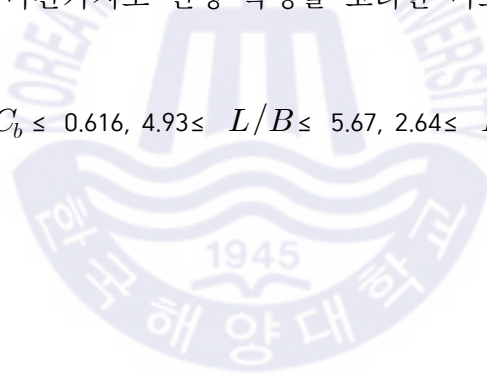
$$\epsilon = -1.4308 B(1-C_b)/L + 0.9453$$

$$\gamma = 0.1608 L/B - 0.5764$$

$$1-w_{P0} = 0.0227 L/B + 0.5818$$

단, 보정된 경험식 역시 제한된 트롤 어선 선형만으로 보정되었기 때문에 아래에 제시된 조건 이외의 선형을 가진 어선에 적용하게 될 경우 추정 오차를 발생시킬 수 있으며, 마찬가지로 선형 특성을 고려한 미소 보정이 필요할 것으로 사료된다.

$$0.574 \leq C_b \leq 0.616, 4.93 \leq L/B \leq 5.67, 2.64 \leq B/d \leq 2.9$$



제 5 장 보정 경험식의 유효성 검증

이 장에서는 4장에서 도출한 트롤 어선의 선형 특성 계수가 포함된 보정 경험식을 이용하여 대상 어선 F1 ~ F4의 조종 유체력 미계수 값을 새로이 도출하였고, 그 값을 이용하여 선회운동 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 3장에서 수행하였던 Formula 1990을 통한 대상 어선의 선회운동 시뮬레이션 결과 및 실선 시험 결과를 함께 비교하여 보정 경험식의 유효성을 검증하였다.

5.1 조종 유체력 미계수 도출

대상 어선 F1 ~ F4의 조종 유체력 미계수 값을 보정 경험식과 3장에서 기술하였던 Formula 1990을 이용하여 Table 5.1과 같이 도출하였고, Fig. 5.1(a) ~ (d)와 같이 도시하여 비교하였다.



Table 5.1 Hydrodynamic derivatives of target fishing vessels

	Formula 1990				Modified formula			
	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4
Y'_β	0.3842	0.4082	0.3629	0.3371	0.3300	0.3261	0.3267	0.3341
$Y'_r - (m' + m'_x)$	-0.1748	-0.1875	-0.1568	-0.1554	-0.2026	-0.2148	-0.1903	-0.1828
N'_β	0.1408	0.1485	0.1379	0.1223	0.1193	0.1199	0.1180	0.1147
N'_r	-0.0562	-0.0581	-0.0555	-0.0511	-0.0498	-0.0497	-0.0497	-0.0499
$Y'_{\beta\beta}$	0.8603	0.8513	0.9034	0.8577	0.7582	0.7465	0.7700	0.7773
Y'_{rr}	0.0063	0.0073	0.0046	-0.0002	-0.0037	-0.0056	-0.0053	-0.0016
$Y'_{\beta rr}$	0.8574	0.8360	0.9601	0.8514	0.6147	0.5867	0.6429	0.6602
$Y'_{\beta\beta r}$	-0.3162	-0.3119	-0.3239	-0.3447	-0.2449	-0.2236	-0.2527	-0.2956
$N'_{\beta\beta}$	-0.0723	-0.0689	-0.0889	-0.0714	-0.0330	-0.0285	-0.0376	-0.0404
N'_{rr}	-0.0317	-0.0275	-0.0377	-0.0382	-0.0225	-0.0184	-0.0266	-0.0291
$N'_{\beta rr}$	-0.0613	-0.0627	-0.0587	-0.0518	-0.0850	-0.0921	-0.0824	-0.0681
$N'_{\beta\beta r}$	-0.2366	-0.1983	-0.3051	-0.3108	-0.3302	-0.3386	-0.3373	-0.3213
$1 - t_R$	0.7200	0.7225	0.7107	0.7144	0.7461	0.7496	0.7424	0.7402
a_H	0.3357	0.3534	0.2742	0.2982	0.5655	0.5967	0.5341	0.5148
x'_H	-1.4264	-1.3936	-1.5333	-1.4931	-0.8835	-0.8108	-0.9568	-1.0017
ϵ	0.9666	0.9994	0.8815	0.8735	0.8373	0.8338	0.8343	0.8411
γ	0.3808	0.3355	0.4396	0.4437	0.2611	0.2158	0.3068	0.3348
$1 - w_{p0}$	0.7465	0.7420	0.7630	0.7564	0.7000	0.6936	0.7065	0.7104

아래의 Fig. 5.1(a)에서 대상 어선의 선형 미계수 절댓값은 $Y'_r - (m' + m'_x)$ 을 제외한 Y'_β , N'_β , N'_r 는 보정 경험식으로부터의 결과가 Formula 1990으로부터의 결과보다 작게 나타났다. 그러나 $Y'_r - (m' + m'_x)$ 는 3장에서 서술한 바와 같이 비교적 작은 값을 가지는 Y'_r 에 상대적으로 큰 값을 가지는 질량 $(m' + m'_x)$ 이 포함되어 있기 Y'_r 의 단독 값 역시 보정된 경험식의 결과 값이 Formula 1990의 값보다 작다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 보정 경험식으로부터의 결과 값은 3장의 Table 3.2에 제시한 바와 같이 선미 형상을 고려한 경험식 Formula 1999와 2003으로부터 도출한 결과 값과 유사한 경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

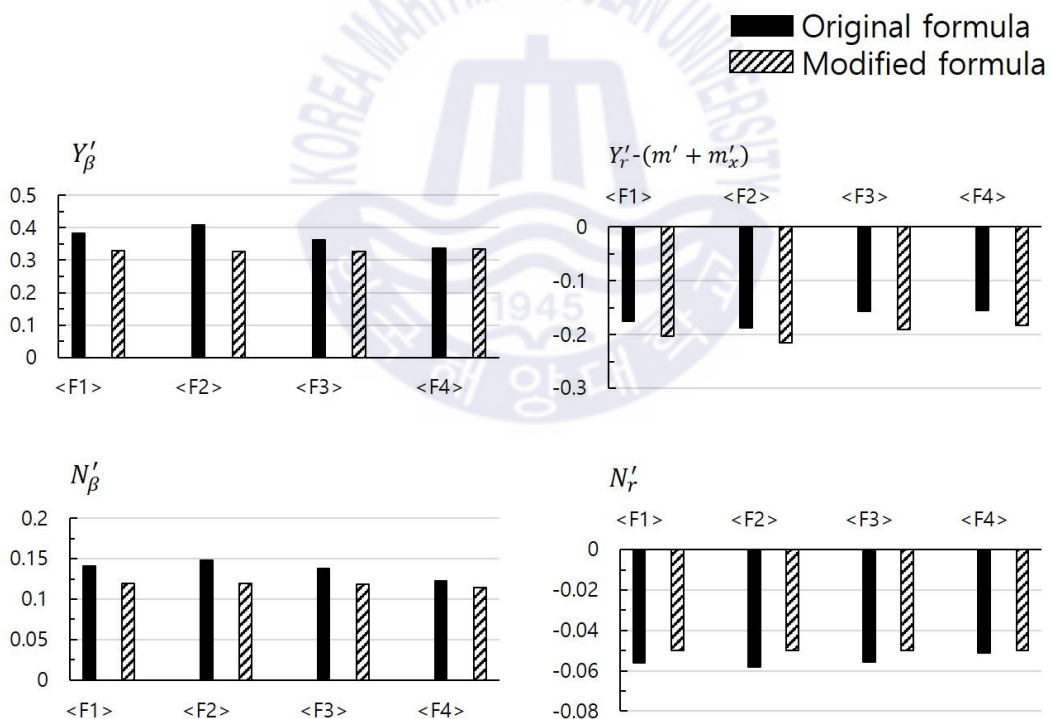


Fig. 5.1(a) Comparison of linear derivatives derived from original and modified formula

아래의 Fig. 5.1(b)을 통해 대상 어선의 횡력 성분의 미계수 절댓값 역시 보정된 경험식으로부터의 결과가 Formula 1990으로부터의 결과보다 다소 작게 나타나고 있음을 확인할 수 있으며, 특이한 점은 Y'_{rr} 의 값이 Formula 1990의 결과는 양의 값을 나타내고 있음에 반해 보정 경험식의 결과는 음의 값을 나타내고 있다. 이러한 보정 경험식으로부터의 결과 역시 3장의 Table 3.2에 제시한 것과 같이 비슷한 C_b 값을 가진 선종인 Container, Car carrier의 Y'_{rr} 값이 나타내는 경향과 유사하며, 선미 형상을 고려하지 않은 경험식 Formula 1999와 2003으로부터 도출한 결과 값의 경향과도 유사하다.

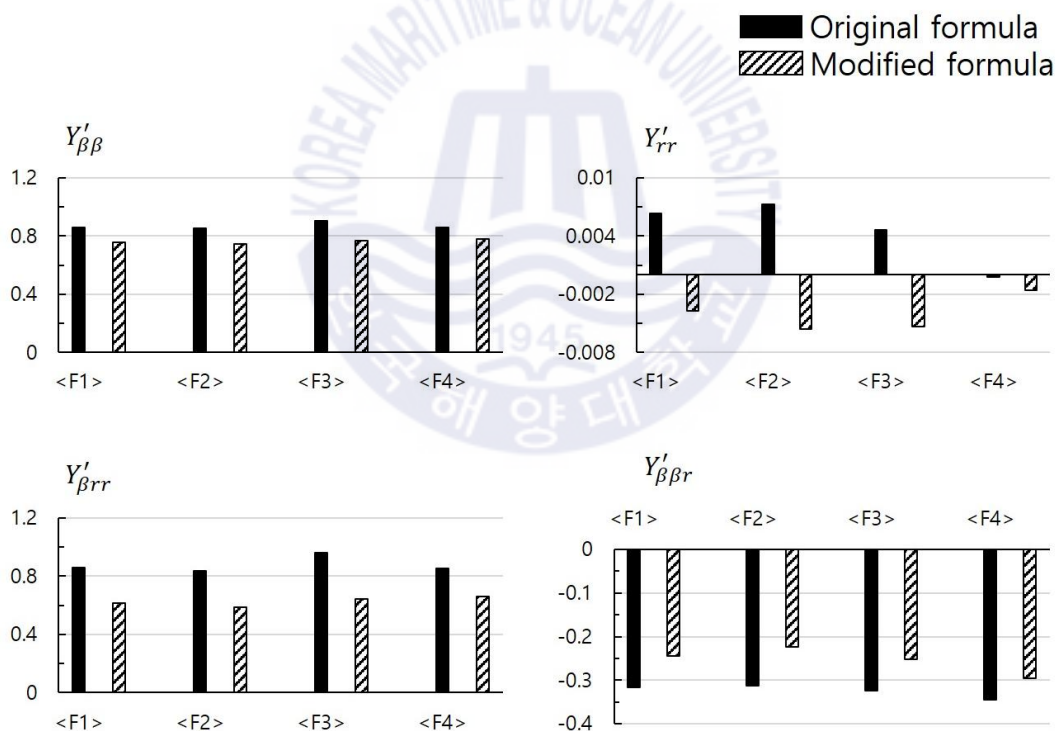


Fig. 5.1(b) Comparison of non-linear(lateral force) derivatives derived from original and modified formula

아래의 Fig. 5.1(c)에서 대상 어선의 모멘트 성분 미계수의 절댓값 $N'_{\beta\beta}$, N'_{rr} 은 보정 경험식으로부터의 결과가 Formula 1990으로부터의 결과보다 작은 값을 나타냈으며, $N'_{\beta\beta}$ 는 두 식으로부터의 결과가 큰 차이를 보였다. 또한, $N'_{\beta rr}$ 와 $N'_{\beta\beta r}$ 는 보정 경험식으로부터의 결과가 큰 값을 나타내고 있음을 확인하였다. 이와 같은 결과는 Fig. 5.1(a)의 선형 미계수 값이나 Fig. 5.1(b)의 횡력 성분 비선형 미계수 값과는 달리 Formula 1999와 2003의 결과 값의 경향과 유사하지 않았다.

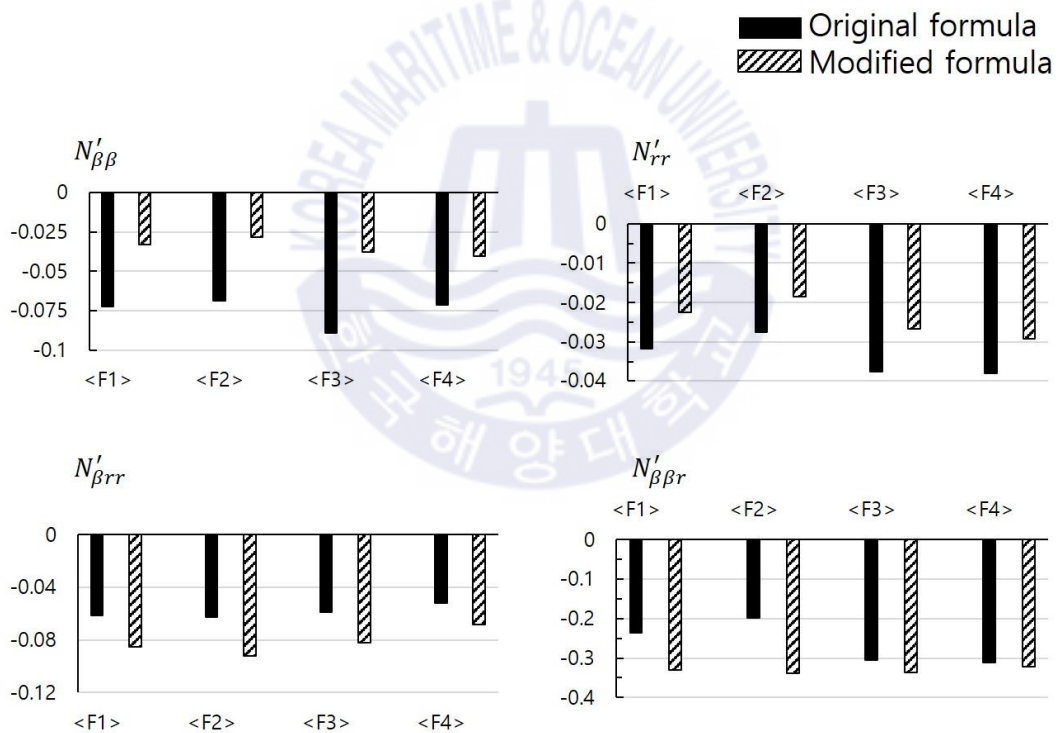


Fig. 5.1(c) Comparison of non-linear(moment) derivatives derived from original and modified formula

아래의 Fig. 5.1(d)에서 간섭 계수 역시 마찬가지로 보정 경험식으로부터의 결과와 Formula 1990으로부터의 결과 값은 다소 차이를 보였으며, 특히, a_H , x'_H , γ 값은 두 식의 결과가 큰 차이를 나타냈다.

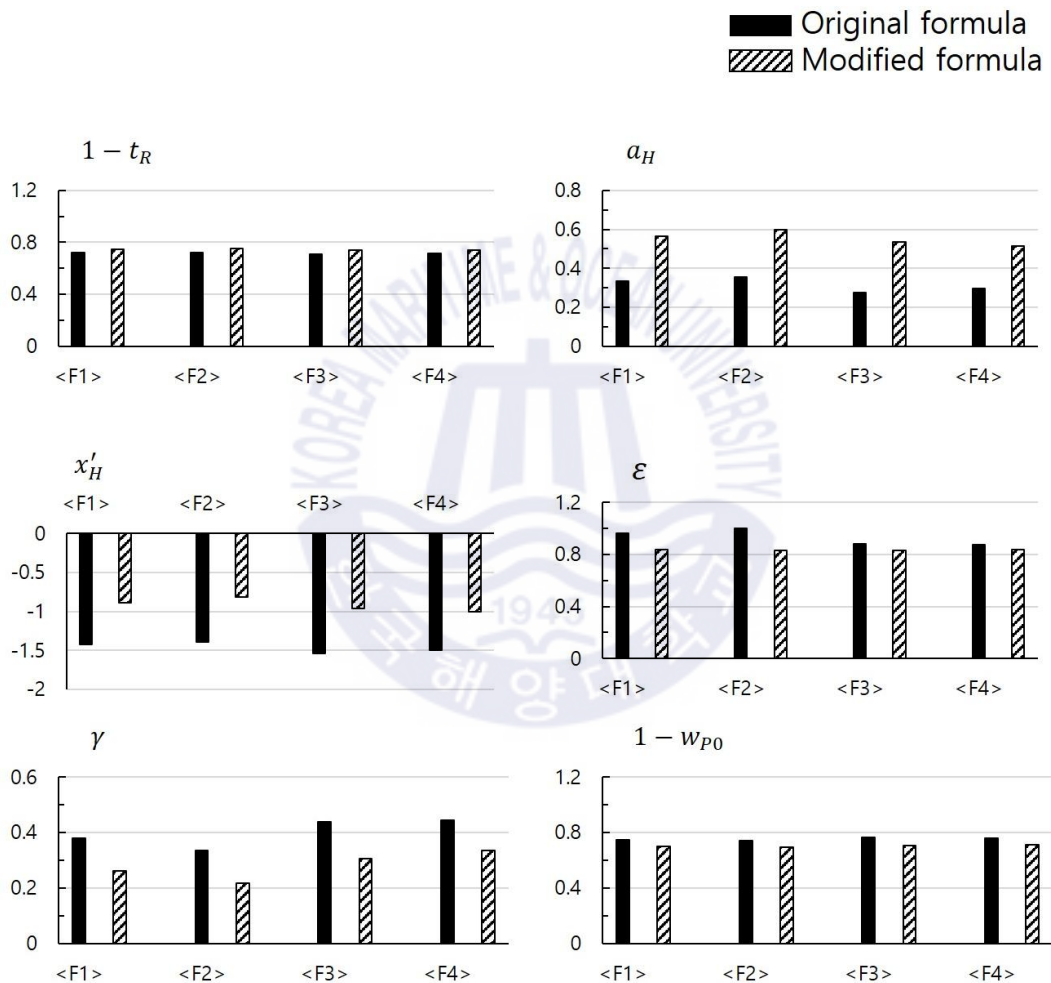


Fig. 5.1(d) Comparison of interaction coefficients derived from original and modified formula

위와 같은 분석 과정을 통하여 보정 경험식으로부터 도출한 대상 어선의 조종 유체력 미계수 값은 Formula 1990으로부터 도출한 미계수 값과는 크고 작은 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 특히, 보정 경험식으로부터 도출한 미계수 값 중 일부는 선미 형상을 고려한 경험식 Formula 1999와 2003으로부터 도출한 값과 유사하기도 하였으며, Formula 1990과는 전혀 다른 부호의 값을 가지면 C_b 값이 비슷한 선종과 유사한 값의 경향을 나타내기도 하였다.

이러한 결과로부터 상선 선형을 대상으로 개발된 Kijima et al. 경험식을 보정 없이 트롤 어선 선형에 적용하여서는 트롤 어선 선형이 가진 고유한 조종 유체력 미계수의 특성을 잘 나타낼 수 없다는 것을 다시 한번 확인하였다.

5.2 선회운동 시뮬레이션 수행

보정된 경험식으로부터 도출한 대상 어선 F1 ~ F4의 조종 유체력 미계수 값을 이용하여 선회운동 시뮬레이션을 실시하고, Formula 1990을 통해 수행하였던 선회운동 시뮬레이션 결과와 함께 실선 시험 결과에 대한 근사 정도를 분석하였다.

5.2.1 수행 조건

보정된 경험식을 이용하여 수행한 선회운동 시뮬레이션 조건은 3장에서 수행하였던 조건과 동일하게 설정하였다.

초기 선속 U_0 는 각 선박의 실선 시험 당시와 동일하게 설정하였고, 흘수는 설계상 만재흘수이면서 등흘수(even keel)로 설정하였고, 수심은 심수 역(deep water), 외란(disturbance)은 없는 것으로 가정하여 IMO 조종성 평가 조건과 동일하게 설정하였다. 시뮬레이션의 수치 계산은 포트란90(MS Fortran Power Station 4.0) 프로그램을 사용하였다.

5.2.2 수행 결과

보정 경험식으로부터 도출한 조종 유체력 미계수 값을 이용하여 대상 어선 4

척의 선회운동 시뮬레이션을 수행하였고, 그 결과 값을 아래의 Table 5.2(a) ~ (d)에 나타내고, Fig. 5.2(a) ~ (d)와 같이 도시하였다.

대상 어선 F1에 대하여 타각 $+35^{\circ}$, -35° 로 선회하였을 경우의 실선 시험 결과와 보정 경험식 및 Formula 1990으로부터 수행한 시뮬레이션의 결과는 Table 5.2(a), Fig. 5.2(a)와 같다.

$+35^{\circ}$ turn에서 Advance의 경우, 실선 시험에서의 결과인 2.56L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 3.84L을 나타내면서 1.28L만큼 확대되었고, 보정 경험식의 결과는 2.50L을 나타내면서 0.06L만큼 축소되었다. 또한, Transfer의 경우, 실선 시험에서의 결과인 1.76L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 2.67L을 나타내면서 0.91L만큼 확대되었고, 보정 경험식의 결과는 1.60L을 나타내면서 0.16L만큼 축소되었다. 마지막으로 Tac. Dia.의 결과는 실선 시험에서의 결과인 3.84L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 5.20L을 나타내면서 1.36L만큼 확대되었고, 보정 경험식의 결과는 3.45L을 나타내면서 0.39L만큼 축소되었다.

-35° turn에서 Advance의 경우, 실선 시험에서의 결과인 2.72L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 3.74L을 나타내면서 1.02L만큼 확대되었고, 보정 경험식의 결과는 2.46L을 나타내면서 0.26L만큼 축소되었다. 또한, Transfer의 경우, 실선 시험에서의 결과인 1.89L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 2.58L을 나타내면서 0.69L만큼 확대되었고, 보정 경험식의 결과는 1.75L을 나타내면서 0.14L만큼 축소되었다. 마지막으로 Tac. dia.의 경우, 실선 시험에서의 결과인 4.14L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 5.06L을 나타내면서 0.92L만큼 확대되었고, 보정 경험식의 결과는 3.41L을 나타내면서 0.73L만큼 축소되었다.

Table 5.2(a) Value of turning-trajectories of F1

	F1	Measured (sea trial test)	Original formula	Modified formula
+35° turn	Advance (m)	160(2.56L)	240(3.84L)	156(2.50L)
	Transfer (m)	110(1.76L)	167(2.67L)	100(1.60L)
	Tac. Dia. (m)	240(3.84L)	325(5.20L)	216(3.45L)
-35° turn	Advance (m)	170(2.72L)	234(3.74L)	154(2.46L)
	Transfer (m)	118(1.89L)	161(2.58L)	109(1.75L)
	Tac. Dia. (m)	259(4.14L)	316(5.06L)	213(3.41L)

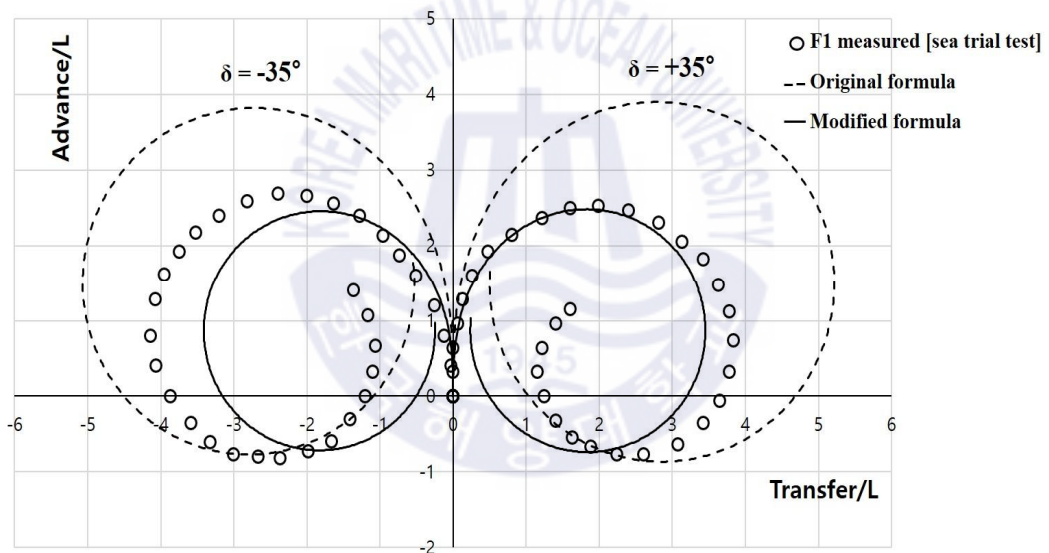


Fig. 5.2(a) Comparison of turning-trajectories of F1

대상 어선 F2에 대하여 타각 $+35^{\circ}$, -35° 로 선회하였을 경우의 실선 시험 결과와 보정 경험식 및 Formula 1990으로부터 수행한 시뮬레이션의 결과는 아래의 Table 5.2(b), Fig. 5.2(b)와 같다.

$+35^{\circ}$ turn에서 Advance의 경우, 실선 시험에서의 결과인 2.81L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 3.70L을 나타내면서 0.89L만큼 확대되었고, 보정 경험식의 결과는 2.25L을 나타내면서 0.56L만큼 축소되었다. 또한, Transfer의 경우, 실선 시험에서의 결과인 1.93L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 2.48L을 나타내면서 0.55L만큼 확대되었고, 보정 경험식의 결과는 1.50L을 나타내면서 0.43L만큼 축소되었다. 마지막으로 Tac. Dia.의 경우, 실선 시험에서의 결과인 3.56L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 4.64L을 나타내면서 1.08L만큼 확대되었고, 보정 경험식의 결과는 2.88L을 나타내면서 0.68L만큼 축소되었다.

-35° turn에서 Advance의 경우, 실선 시험에서의 결과인 2.84L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 3.61L을 나타내면서 0.77L만큼 확대되었고, 보정 경험식의 결과는 2.22L을 나타내면서 0.62L만큼 축소되었다. 또한, Transfer의 경우, 실선 시험에서의 결과인 2.03L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 2.46L을 나타내면서 0.43L만큼 확대되었고, 보정 경험식의 결과는 1.48L을 나타내면서 0.55L만큼 축소되었다. 마지막으로 Tac. dia.의 경우, 실선 시험에서의 결과인 3.71L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 4.55L을 나타내면서 0.84L만큼 확대되었고, 보정 경험식의 결과는 2.86L을 나타내면서 0.85L만큼 축소되었다.

Table 5.2(b) Value of turning-trajectories of F2

F2		Measured (sea trial test)	Original formula	Modified formula
+35° turn	Advance (m)	170(2.81L)	224(3.70L)	136(2.25L)
	Transfer (m)	117(1.93L)	150(2.48L)	91(1.50L)
	Tac. Dia. (m)	216(3.56L)	281(4.64L)	175(2.88L)
-35° turn	Advance (m)	172(2.84L)	219(3.61L)	135(2.22L)
	Transfer (m)	123(2.03L)	149(2.46L)	90(1.48L)
	Tac. Dia. (m)	225(3.71L)	276(4.55L)	173(2.86L)

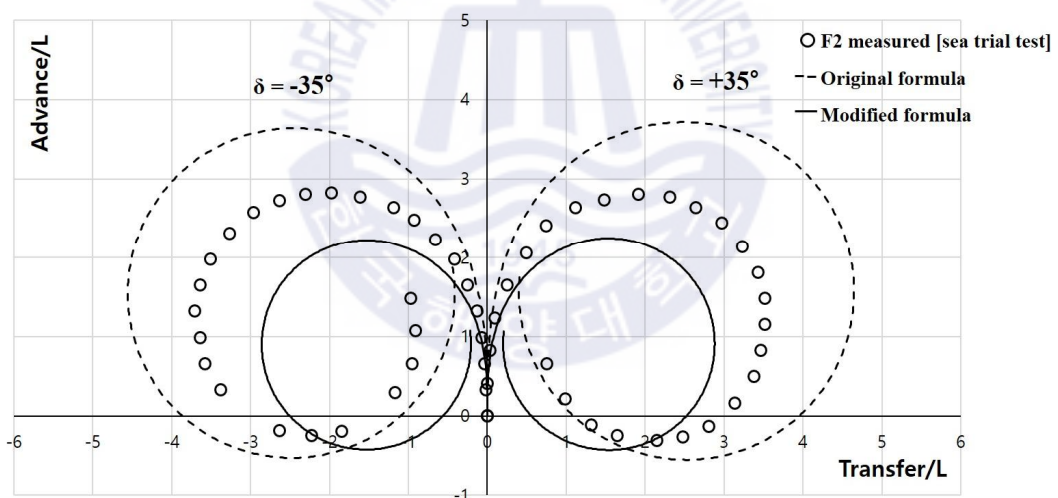


Fig. 5.2(b) Comparison of turning-trajectories of F2

대상 어선 F3 역시 타각 $+35^{\circ}$, -35° 로 선회하였을 경우의 실선 시험 결과와 보정 경험식 및 Formula 1990으로부터 수행한 시뮬레이션의 결과는 아래의 Table 5.2(c), Fig. 5.2(c)와 같다.

$+35^{\circ}$ turn에서 Advance의 경우, 실선 시험에서의 결과인 2.74L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 4.26L을 나타내면서 1.52L만큼 확대되었고, 보정 경험식의 결과는 2.68L을 나타내면서 0.06L만큼 축소되었다. 또한, Transfer의 경우, 실선 시험에서의 결과인 1.70L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 3.09L을 나타내면서 1.39L만큼 확대되었고, 보정 경험식의 결과는 1.67L을 나타내면서 0.03L만큼 축소되었다. 마지막으로 Tac. Dia.의 경우, 실선 시험에서의 결과인 4.25L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 6.03L을 나타내면서 1.78L만큼 확대되었고, 보정 경험식의 결과는 3.62L을 나타내면서 0.63L만큼 축소되었다.

-35° turn에서 Advance의 경우, 실선 시험에서의 결과인 2.79L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 4.15L을 나타내면서 1.36L만큼 확대되었고, 보정 경험식의 결과는 2.68L을 나타내면서 0.11L만큼 축소되었다. 또한, Transfer의 경우, 실선 시험에서의 결과인 1.82L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 3.05L을 나타내면서 1.23L만큼 확대되었고, 보정 경험식의 결과는 1.66L을 나타내면서 0.16L만큼 축소되었다. 마지막으로 Tac. dia.의 경우, 실선 시험에서의 결과인 3.99L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 5.79L을 나타내면서 1.80L만큼 확대되었고, 보정 경험식의 결과는 3.55L을 나타내면서 0.44L만큼 축소되었다.

Table 5.2(c) Value of turning-trajectories of F3

F3		Measured (sea trial test)	Original formula	Modified formula
+35° turn	Advance (m)	199(2.74L)	309(4.26L)	194(2.68L)
	Transfer (m)	123(1.70L)	224(3.09L)	121(1.67L)
	Tac. Dia. (m)	308(4.25L)	437(6.03L)	263(3.62L)
-35° turn	Advance (m)	202(2.79L)	301(4.15L)	194(2.68L)
	Transfer (m)	132(1.82L)	221(3.05L)	120(1.66L)
	Tac. Dia. (m)	289(3.99L)	420(5.79L)	257(3.55L)

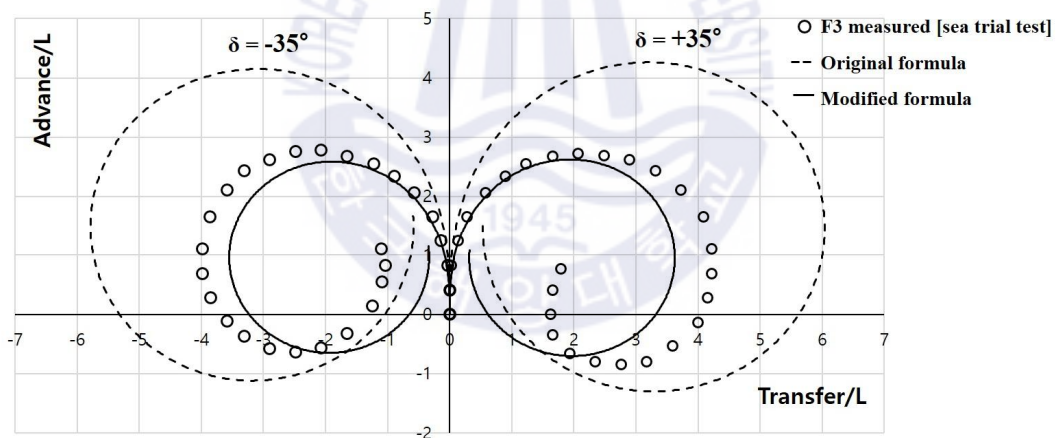


Fig. 5.2(c) Comparison of turning-trajectories of F3

대상 어선 F4에 대하여 타각 $+35^{\circ}$, -35° 로 선회하였을 경우의 실선 시험 결과와 보정 경험식 및 Formula 1990으로부터 수행한 시뮬레이션의 결과는 아래의 Table 5.2(d), Fig. 5.2(d)와 같다.

$+35^{\circ}$ turn에서 Advance의 경우, 실선 시험에서의 결과인 2.22L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 3.41L을 나타내면서 1.19L만큼 확대되었고, 보정 경험식의 결과는 2.35L을 나타내면서 0.13L만큼 축소되었다. 또한, Transfer의 경우, 실선 시험에서의 결과인 1.41L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 2.36L을 나타내면서 0.95L만큼 확대되었고, 보정 경험식의 결과는 1.60L을 나타내면서 역시 0.19L만큼 확대되었다. 마지막으로 Tac. Dia.의 경우, 실선 시험에서의 결과인 2.33L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 4.59L을 나타내면서 2.26L만큼 확대되었고, 보정 경험식의 결과는 3.93L을 나타내면서 1.60L만큼 축소되었다.

-35° turn에서 Advance의 경우, 실선 시험에서의 결과인 2.38L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 3.31L을 나타내면서 0.93L만큼 확대되었고, 보정 경험식의 결과는 2.29L을 나타내면서 0.09L만큼 축소되었다. 또한, Transfer의 경우, 실선 시험에서의 결과인 1.29L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 2.40L을 나타내면서 1.11L만큼 확대되었고, 보정 경험식의 결과는 1.65L을 나타내면서 역시 0.36L만큼 확대되었다. 마지막으로 Tac. dia.의 경우, 실선 시험에서의 결과인 2.22L에 비교하여 보면, Formula 1990으로 도출한 결과는 4.66L을 나타내면서 2.44L만큼 확대되었고, 마찬가지로 보정 경험식의 결과 또한 2.80L을 나타내면서 0.58L만큼 확대되었음을 확인하였다.

Table 5.2(d) Value of turning-trajectories of F4

F4		Measured (sea trial test)	Original formula	Modified formula
+35° turn	Advance (m)	189(2.22L)	290(3.41L)	200(2.35L)
	Transfer (m)	120(1.41L)	201(2.36L)	136(1.60L)
	Tac. Dia. (m)	198(2.33L)	390(4.59L)	249(3.93L)
-35° turn	Advance (m)	202(2.38L)	281(3.31L)	195(2.29L)
	Transfer (m)	110(1.29L)	204(2.40L)	140(1.65L)
	Tac. Dia. (m)	189(2.22L)	396(4.66L)	238(2.80L)

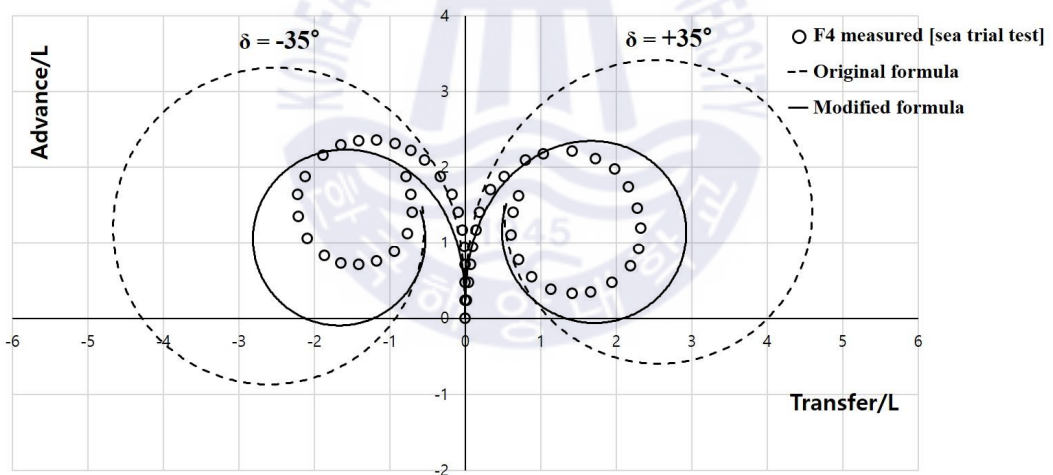


Fig. 5.2(d) Comparison of turning-trajectories of F4

5.2.2 수행 결과 분석

3.3절과 같은 맥락으로, 대상 어선에 대하여 보정 경험식과 Formula 1990으로부터 수행한 선회운동 시뮬레이션 결과를 실선 시험 결과와 비교하기 위하여

아래의 Table 5.3과 같이 나타내었다. 여기서, Table 5.3은 대상 어선 4척의 평균값을 나타낸 것이며, 실선 시험의 결과를 기준 값 ‘1’ 로 설정하였다.

Table 5.3 Quantitative comparison of turning-trajectories

Model fishing vessel	Measured (sea trial test)	Original formula	Modified formula
Advance	1	1.43(+43%)	0.93(-7%)
Transfer	1	1.55(+55%)	0.96(-4%)
Tac. Dia.	1	1.50(+50%)	0.95(-5%)
Average	1	1.49(+49%)	0.94(-6%)

Table 5.3에서 보정 경험식으로부터 수행한 대상 어선의 선회운동 시뮬레이션 결과는 실선 시험 결과와 비교하였을 때, 전체 선회 궤적의 평균 크기는 0.94배(-6%)로 축소되어 나타났으며, 특히 Advance가 0.93배(-7%)로 가장 높았고, Transfer가 0.96배(-4%)로 가장 낮았다. 이는 Formula 1990으로부터 수행한 결과에서 발생하는 오차 범위 49%보다 트롤 어선 선회의 조종성능을 추정함에 있어서 43% 더 정도 높은 추정이 가능하다는 것을 의미한다. 이와 같은 결과로부터 보정된 경험식이 트롤 어선의 조종성능을 추정함에 있어서 더욱 정도 높은 추정이 가능할 것으로 판단하였다.

한편, Table. 5.3에서 formula 1990으로부터 도출한 대상 어선의 평균 선회 궤적의 크기는 실선 시험 결과와 비교하여 확대된 반면, 보정 경험식으로부터 도출한 평균 선회 궤적의 크기는 실선 시험 결과보다 축소되었다. 또한, Fig. 5.2(a) ~ (d)에서 확인할 수 있듯, 보정 경험식의 결과 내에서도 일반타를 탑재하고 있는 F1 ~ F3의 선회 궤적은 실선 시험 결과에 비하여 작게 나타난 반면, 플랩타를 탑재하고 있는 F4의 경우는 실선 시험 결과에 비하여 크게 나타났다. 이러한 결과는 경험식을 통해서는 정도 높은 추정이 힘든 간섭 계수를 추정하는 과정에서 발생하는 것으로 판단되며, 다음의 5.3절에서 간섭 계수에 따라 달

라지는 선회 궤적의 크기에 대하여 고찰하여 보았다.

5.3 간섭 계수 γ 값에 대한 고찰

초기 설계 단계에서 추정하기가 가장 어렵고 복잡한 계수는 선체, 프로펠러, 타 사이에 작용하는 $a_H, x_H', w_{R0}, w_{P0}, \gamma$ 등의 간섭 계수이며, 특히, 정류 계수 γ 와 유효 반류 계수 w_{R0} 는 조종 특성에 매우 중요한 영향을 끼침에도 불구하고 정도 높은 추정이 더욱 어렵다. 하지만 설계 단계에서 선박의 조종성능을 정도 높게 추정하기 위해서는 간섭 계수의 추정이 반드시 필요하기 때문에 현재까지는 대상 선종이 가진 고유의 조종 특성을 고려하여 추정하고 있다(Kijima et al 1990).

본 연구에서도 서론에 기술한 바와 같이 선체 길이에 비해 큰 타 면적비를 가지는 어선 고유의 조종 특성을 고려하였다.

상기한 간섭 계수 중에서도 특히, 정류 계수 γ 는 Advance와 Tac. Dia.에 큰 영향을 끼치는 계수이며, 이 값은 2장의 식 (16)에서 확인할 수 있듯이 타 면적비에 따라 달라지는 직압력 F_N' 와 관련이 있다. 아래의 Fig. 5.3은 대상 선박 F3을 예로 들어, 단순히 정류 계수 γ 값을 변화시키면서 γ 값과 직압력 F_N' 와의 상관관계와 그에 따라 변화하는 선회 반경을 도시하였다. 그 결과, γ 값이 작을수록 F_N' 은 크고 Tac. Dia.가 작아지며, 반대로 γ 값이 클수록 F_N' 이 작아지며 Tac. Dia.가 커지는 경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

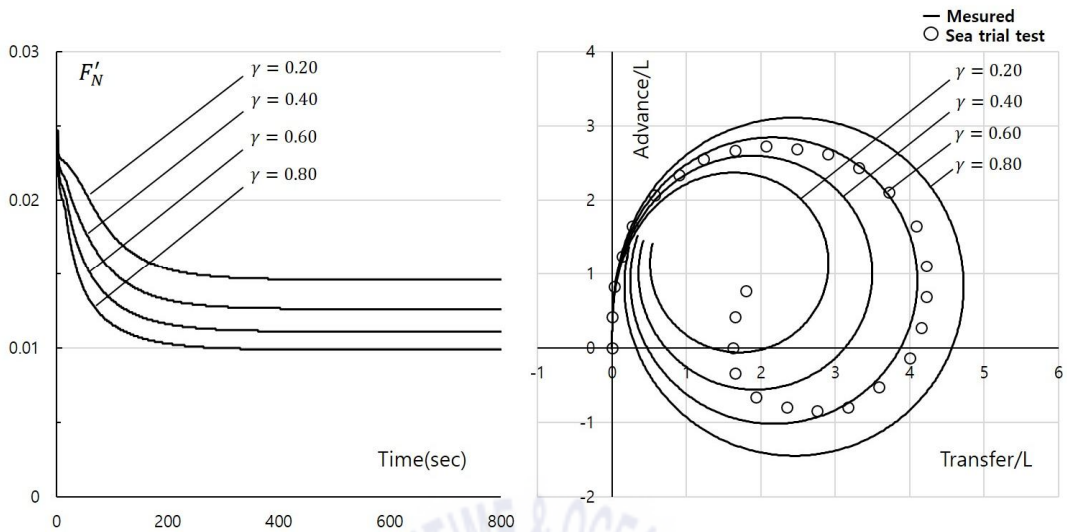


Fig. 5.3 Turning characteristics depending on the variation of γ of F3

위와 같은 경향을 고려하여 대상 어선 4척이 나타내는 보정된 경험식으로부터의 선회운동 시뮬레이션 결과를 고찰하였다. 우선, 대상 어선 F1 ~ F3의 선회운동 시뮬레이션 결과의 궤적 크기는 실선 시험 결과의 궤적 크기보다 모두 축소되어 나타난 반면, F4는 확대되어 나타났다. 이는 F4가 플랩타를 탑재하고 있어 타 면적비가 작기 때문에 발생한 것으로 추측할 수 있으며, 이를 확인을 위하여 아래의 Fig. 5.4와 같이 식 (31)의 정류 계수 $\gamma_{값}$ 도출 식에 포함된 선회 특성 계수 $C_b B/L$ 과 타 면적비 A_R/Ld 를 상관시켜 나타내었다.

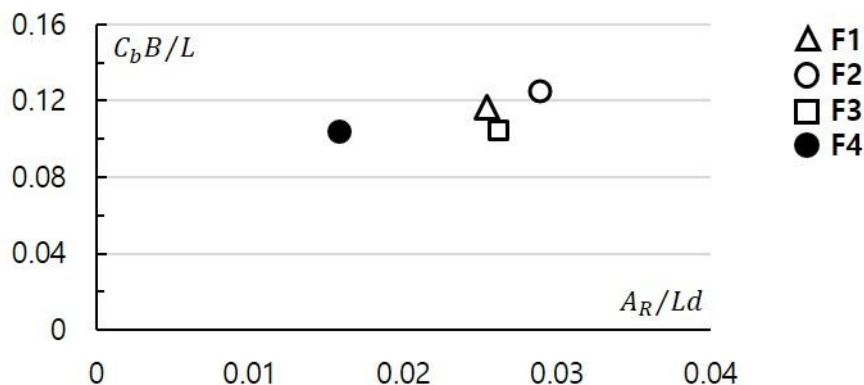


Fig. 5.4 Values of $C_b B/L$ according to A_R/Ld

그 결과, 대상 어선 F1 ~ F4의 선형 특성 계수 $C_b B/L$ 은 모두 0.11 부근으로 비슷한 값을 나타냈으며, 이를 통해 대상 어선은 비슷한 범위의 미계수 γ 값을 가질 것으로 추측할 수 있다. 그러나 타 면적비 A_R/Ld 의 경우, F1 ~ F3는 0.026 부근을 나타내는 반면, F4는 0.016 부근을 나타내며 눈에 띄는 차이를 보였다. 이러한 결과로부터 단순히 식 (31)을 이용하여 도출한 γ 값은 비슷할지라도, 직압력 F'_N 의 크기에 영향을 미치는 타 면적비 A_R/Ld 이 다른 범위를 가지면 선회 반경의 차이가 발생할 수 있음을 확인할 수 있다.

이와 같이 Kijima et al.(1990) 경험식에는 일반적인 어선 선형의 타 면적비가 포함되지 않았기 때문에 γ 값을 도출하는 선형 특성 계수 $C_b B/L$ 값이 같더라도 선회 반경은 실선 시험 결과에 비하여 축소되어 나타나며, 이는 해당 선형의 특성을 고려한 보정을 필요로 한다.

제 6 장 요약 및 결론

어선은 어획 대상과 조업 방식에 따라 여러 가지 선형을 가지고 있기 때문에 선종에 따라 특정한 선형을 가지는 상선과 마찬가지로 각 선형마다 고유한 선형 특성 계수를 가진다. 트롤 어선 선형 역시 신속한 어장 이동 및 어군 탐색을 위한 날렵한 선체와 조업 기간 중 충분한 어창 용적을 동시에 확보해야 하는 고유의 특성을 가지고 있다. 어선은 대부분 길이 $100m(L_{pp})$ 미만으로써 IMO 조종성 기준의 적용 대상에서 제외되므로, 어선의 조종자들은 자선의 조종성능에 관한 정확한 정보를 제공 받는 데에 한계가 있다. 상선 선형을 대상으로 개발된 경험식을 어선에 적용하여 조종성능을 평가할 경우에는 어선과 상선 간의 선형 특성의 차이로 인한 추정오차를 발생시킬 수 있다.

이에 이 연구에서는 조종 유체력 미계수를 도출하는 다항식을 상세하게 제안된 Kijima et al.(1990) 경험식으로부터 대상 트롤 어선 5척과 VLCC를 비롯한 상선 13척의 조종 유체력 미계수 값을 도출하였고, 어선과 상선 선형의 미계수 값이 나타내는 분포의 차이를 추세선을 이용하여 평균화시킴으로써, 어선 선형의 선회성능 추정 정도를 향상시킬 수 있는 보정 경험식을 도출하였다.

보정 경험식을 통하여 대상 어선 5척의 조종 유체력 미계수 값을 재차 도출하였고, 건조 중인 한척의 선박을 제외한 4척의 실선 시험을 통하여 얻은 대상 어선의 선회권 시험 결과와 비교하여 이를 검증하였다.

보정 경험식을 도출을 위한 선행 연구에서 대상 어선의 선형 특성 계수를 분석한 결과, 특정 값은 C_b 값이 비슷한 Container 및 Car carrier 와 유사한 경향을 나타내고 있었으며, 또 다른 값은 L/B 값이 비슷한 VLCC나 ULCC와 유사한 경향을 나타내고 있음을 파악하였다. 그러나 $C_b B/L$ 이나 dC_b/B 는 어떠한 상선 선종과도 유사하지 않은 고유한 값을 가지고 있는 것으로 확인되었다. 또한, Kijima et al.(1990) 경험식을 이용하여 대상 어선에 대한 조종 유체력 미계수 값을 도출하고 선회운동 시뮬레이션을 수행한 결과, 아무런 보정 없이는 대상 어선의 조종성능을 추정하기 어려울 만큼의 오차를 가지고 있는 것으로 확인되

었다.

이와 같은 결과는 상선 선형을 대상으로 개발된 이 경험식에는 어선의 선형을 나타낼 수 있는 특성 계수가 포함되지 않았기 때문에 발생하는 것으로 판단되며, 특히, 모형시험 결과의 회귀분석 과정에서 높은 상관관계를 가지는 $C_b B/L$ 와 dC_b/B 등의 값이 어선과 상선의 선형 간에 큰 차이를 나타내기 때문으로 파악되었다. 그러므로 설계 단계에서 경험식을 이용하여 트롤 어선 선형의 선회성능을 추정하기 위해서는 선체 형상의 특성을 나타내는 계수 중 $C_b B/L$ 와 dC_b/B 는 반드시 포함되어야 할 것으로 판단된다.

이에 추정 오차를 최소화하는 연구로써 Kijima et al.(1990) 경험식으로부터 대상 선박들의 조종 유체력 미계수 값을 도출하고, 각 선박들이 가지는 특성 계수들을 상관시켜 그 결과를 그래프로 나타내었다. 조종 유체력 미계수 값과 높은 상관관계를 가지는 동시에 대상 어선의 선형 특성이 포함되지 않은 계수는 추계식을 이용하여 보정하는 방법으로 오차를 최소화할 수 있는 보정된 경험식을 도출하였다.

이와 같은 과정으로부터 도출한 보정 경험식과 기존의 Kijima et al.(1990) 경험식을 통하여 추정한 대상 어선의 선회권 크기와 실선 시험을 통하여 얻은 선회권의 크기를 비교하여 근사 정도를 검증하였다. Kijima et al.(1990) 경험식으로부터 추정한 선회권의 크기는 평균 49%의 오차를 가졌으나, 보정 경험식의 결과는 평균 6%의 오차를 가지고 있음을 확인하였다.

향후, 이 연구를 통하여 얻은 보정 경험식으로 트롤 어선에 대한 설계 단계에서의 정도 높은 선회성능 추정이 가능하며, 조선자에게 좁은 어항과 수로에서의 선박 조종 그리고 어장에서의 조업 안전과 어획능률 향상에 유용하게 활용케 할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- Ahn, Y.H., Park, M.H., Choi, C.M., & Chung, Y.J., 2001, *A Study on the Maneuverabilities of the Training ship M.S. A-RA*. Bulletin of the. Korean. Society of Fisheries Technology, 37(4), pp.275-284.
- An, Y.S. et. al., 2005, *A Study on the Manoeuvrability of T/S SAEBADA by Real sea trials*. Journal of the Korean Society of Fisheries Technology, 41(4), pp.289-295.
- Dan Obreja et al., 2010, *Identification of hydrodynamic coefficients for manoeuvring simulation model of a fishing vessel*, 37, pp.678-687
- Hess, F., 1978, *Lifting-surface theory applied to ship-rudder systems*. International Shipbuilding Progress, 292(25), pp.299-305.
- IMO, Resolution A.751(18), adopted on 4 November 1993. *Interim Standards for Ship Manoeuvrability*.
- IMO, Resolution MSC 137(76), 2002. "Standards for Ship Manoeuvrability" Report of the Maritime Safety Committee on Its 76th Session-Annex 6. 1-6.
- ITTC, 2002. *Report of the special committee on Esso Osaka*. Proceedings of the 23rd ITTC.
- Inoue, S., Hirano, M., Kijima, K., & Takashina, J., 1981, *A practical calculation method of ship maneuvering motion*. International Shipbuilding Progress, 325(28), pp.207-222.
- Jeong, H.S., Kim, K.Y., & Kim, M.S., 1998, *A Study on the Maneuverabilities of the Training ship M.S GALMAEGI NO.2*. Bulletin of the. Korean. Society of Fisheries Technology, 34(4), pp.366-371.
- Jee, H.W. et al., 2009, *Resistance Performance of Korean Small Coastal Fishing Boat in Low Speed Range*. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 46(1), pp.10-23.
- Korea Research Institute of Ships And Ocean Engineering, 2000, *Hull Form*

- Study Dasun G/T 990Ton Class Fisheries Training Ship*. Korea Research Institute of Ships And Ocean Engineering.
- Korea Maritime Safety Tribunal, 2019, *Statistical data of maritime accidents and casualty*. Available at: <https://www.kmst.go.kr/kmst/statistics/annualReport/selectAnnualReportList.do> [Accessed 2 Mar 2019].
- Karasuno, K., 1969, *Studies on the Lateral Force on a Hull Induced by Rudder Deflection*. Journal of the Kansai Society of Naval Architects, Japan, 133, pp.14-19.
- Kose, K., Yumuro, A., & Yoshimura, Y., 1981, *Concrete of Mathematical Model for Ship Manoeuvring*. In: Proceedings of the 3rd symposium on ship maneuverability, Society of Naval Architects of Japan, pp.27-80.
- Kijima, K. Katsuno, T. Nakiri, Y. & Furukawa, Y., 1990. *On the manoeuvring performance of a ship with the parameter of loading condition*. The Society of Naval Architects of Japan, 168, pp.141-148.
- Kijima, K., 1995. *Outline of research on ship manoeuvrability*. 第1章 操縦性研究概説, 操縦性研究概説・第12回 シンポジウム, The Japan Society of Naval Architects, pp.1-22.
- Kijima, K. and Nakiri Y., 1999. *Approximate Expression for Hydrodynamic Derivatives of Ship Manoeuvring Motion taking into account of the Effect of Stern Shape*. The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineering, 1999, 98, pp.67-77.
- Kijima K. and Nakiri Y., 2003. *On the Practical Prediction Method for Ship Manoeuvring Characteristics*. The Society of Naval Architects and Ocean Engineering, 105, pp.21-31.
- Kobayashi, E., Kagemoto, H., & Furukawa, Y., 1995, *Mathematical Models of Ship Manoeuvring Motions*. 第2章 操縦性研究概説, 操縦性研究概説・第12回 シンポジウム, The Japan Society of Naval Architects, pp.23-89.
- Kim K.Y., 1979, *Manoeuverabilities of the M.S “SAEBADA”*. Bulletin of the

Korean. Society of Fisheries Technology, 12(4), pp.209-215.

Kim, K.Y., 1999, *The Effect of the Speed of a Ship on Hull Turning Circle*. Bulletin of the Korean. Society of Fisheries Technology, 35(3), pp.209-214.

Kim, M.S., 1993, *A study on the fishing method of the midwater trawl – on the maneuverabilities of the fishing boat under operation*. Bulletin of the Korean. Society of Fisheries Technology, 29(4), pp.260-271.

Kim, M.S., Shin, H.O., Kang, K.M. & Kim M.S., 2005, *Variation of Turning Circle by the Rudder Angle and the Ship's Speed*. Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology, 41(2), 156-164.

Kim, M.S., Shin, H.I., Kim, J.H. & Kang, I.K., 2009, *A Study on the Maneuverabilities of the T/S KAYA*. Journal of Fisheries and Marine Sciences Education, 21(1), pp. 59-67.

Kim, S.H. and Lee, C.K., 2019. *A study on the turning-motion of T/S SAEBADA in shallow water*. Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology, 54(3), pp.273-283.

Kim, D.H., 2018. *A study on the maneuvering characteristics of a damaged surface combatant ship*. ph.D. Seoul: Seoul National University.

Lee, C.K. et. al., 2018. *A study on the characteristics of manoeuvrability of fishing vessel*. Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology, 54(3), pp. 239-245.

Lee, C.K., Kim, S.H., Lee, S.M., & Yim, J.B., (In press). *Study on the manoeuvring prediction of a fishing vessel*. American Society of Naval Engineers. accepted for publication September 2019).

Matsumoto, K. and Suemitsu. K., 1980, *The Prediction of Manoeuvring Performances by Captive Model Tests*. Journal of the Kansai Society of Naval Architects, Japn, 176. pp.11-22.

Mori, S., 1995, *Note of ship form design(24)*. FUNE-NO-KAGAKU, 48, pp.40-49.

Ogawa, A., Koyama, T., & Kijima, K., 1977, MMG report- I, *on the*

- mathematical model of ship manoeuvring*. Bulletin of the Society of Naval Architects of Japan, 575, pp.22-28.
- Ogawa, A. and Kasai, H., 1987, *On the mathematical model of manoeuvring motion of ships*, International Shipbuilding Progress, 292(25), pp.306-319.
- Park, S.P. and Kim, K.Y., 1998, *A study on the Maneuverabilities of the Training ship M.S HEUIMANGBONG*. Bulletin of the. Korean Society of Fisheries Technology, 34(1), pp.62-66.
- Son, K.H., 2001. *Ship Motion & Manoeuvrability*.
- Yoshimura, Y., Ma, N., Suzuki, S., & Kajiwara, Y, 2002, *Manoeuvring Performance of the Fishing Boat Modified by a Bulge*. The Society of Naval Architects of Japan, 192, pp.37-46.
- Yoshimura, Y. and Ma, N., 2003, *Manoeuvring Prediction of Fishing vessel*. MARSIM 03' Conference Proceedings, pRC-29-1-10.
- Yoshimura, Y. and Masumoto. Y., 2011, *Hydrodynamic Force with Medium High Speed Merchant Ships Including Fishing Vessels and Investigation into a Manoeuvring Prediction Method*. The Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineering, 14, pp.63-73.
- Yasukawa, K. and Yoshimura, Y., 2015. *Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions*. Journal of Marine Science and Technology, 20, pp.37-52.
- Yoon, J.D., 2002. *Theory and Practice of Ship Manoeuvring*. Sejong Publishing Co..
- Yim, S.J., 1989. 基本造船學. Translated by Principles of Naval Architecture, The Society of Naval Architects and Marine Engineers.